

Realizace měřicího přípravku pro transformátor nn

Realization of Measurement Assembly for Low Voltage Transformer

Tomáš Braš

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Kačor Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením laboratorní úlohy pro studenty předmětu elektrické stroje I.

V teoretické části jsou vysvětleny základní informace k transformátorům obecně, a později se teoreticky práce přesune k základním možnostem chránění transformátorů nízkého napětí. Nakonec jsou shrnuty možné typy spínání transformátorů nízkého napětí.

Další část bakalářské práce je věnována tvorbě samotného výrobku, kdy jsou vybírány vhodné součástky pro tvorbu samotného přípravku a jeho samotná tvorba.

V třetí části této práce je prováděno měření na přípravku, kdy se prvně měří transformátor ve stavu na krátko a ve stavu na prázdno, aby se mohla provést jeho parametrizace. Poté se přechází na měření přechodných dějů při spínání transformátoru do zkratu a na prázdno, kdy se sledují dynamické zapínací proudy.

Čtvrtá část je věnována tvorbě laboratorní úlohy pro studenty daného předmětu, aby mohli pochopit danou problematiku na co nejjednodušším zapojení.

Závěrem jsou shrnuté výsledky, kde popisují úspěšnost tvorby přípravku a jeho odzkoušení při vlastním měření v laboratoři.

Abstract

This bachelor thesis is dealing with creating of laboratory task for students of Electrical Machines I.

In a theoretical part there are explained basic informations of transformers in general, and later the theory moves to basic options of protecting low-voltage transformers. At the end there are summarized options for switching low-voltage transformers.

Next part of bachelor thesis is dedicated to creation of measurement assembly where I choose appropriate components for a measurement assembly and creation of itself.

In the third part of this thesis the measurement is done on the measurement assembly where the first measurement was done in transformer being short-circuited and open-circuited so we could find out its parameters. After that measurement of transients during switching the transformer on in short-circuit and open-circuit was done where we looked at dynamic inrush current.

Forth part is dedicated to creation of laboratory task for students of stated class to understand given problems in the easiest circuit possible.

At the end there are summary of the results where I describe succes of creation of measurement assembly and its testing during my own measuring int the lab.

Klíčová slova

transformátor, zkraty, proud na prázdno, poruchové stavy, nízké napětí, přípravek, tvorba laboratorní úlohy, přechodné děje

Key words

Transformer, short-circuir, open-circuit current, fault conditions, low voltage, measurement assembly, creation of laboratory task, transients

Poděkování

Předně bych rád poděkoval panu Ing. Petru Kačorovi Ph.D. za konzultace, odborné rady a poskytnutý dohled při měření v laboratoři. Také bych rád poděkoval za jeho časovou flexibilitu a vyhovění mi ve všech mých žádostech při psaní této bakalářské práce.

Dále děkuji všem mým přednášejícím a cvičícím v průběhu mého bakalářského studia za předané vědomosti, bez kterých by tato bakalářská práce nebyla možná. Hlavně bych chtěl vyzdvihnout Ing. Zdeňka Hytku, CSc., Ing. Petra Bernata, Ph.D., Ing. Tadeusze Sikoru, Ph.D. a prof. Ing. Stanislava Mišáka, Ph.D. za obrovskou snahu výuku vést s co největším smyslem a náhledem do praxe. Tyto hodiny byly pro mě nejlepší za celé bakalářské studium, děkuji.

Potom mé díky patří mojí rodině, přátelům a přítelkyni. Předně mým rodičům, kteří mě vždy podpoří v mých rozhodnutích. Rostislavu Bielovi za to, že je občas mou osobní vrbou a kamarádem v dobrém i zlém. Nakonec mé nejdražší přítelkyni Kamile Homolíkové za neomezenou psychickou podporu při psaní této práce. Mám vás všechny rád.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	5
SEZNAM ILUSTRACÍ.....	7
SEZNAM TABULEK.....	8
ÚVOD.....	9
1 TEORIE.....	10
1.1 TRANSFORMÁTORY, KONSTRUKCE, JEJICH FUNKCE A MÍSTO V SÍTI.....	10
1.1.1 <i>Funkce transformátoru v síti</i>	10
1.1.2 <i>Rozdělení, konstrukce a princip transformátoru</i>	10
1.1.3 <i>Náhradní schéma transformátoru</i>	12
1.2 STAVY NA TRANSFORMÁTORU A JEJICH MĚŘENÍ	13
1.2.1 <i>Chod a náhradní schéma transformátoru na prázdno a na krátko</i>	13
1.2.2 <i>Průběh zapínacího proudu při stavu na prázdno</i>	14
1.2.3 <i>Průběh zkratového proudu</i>	15
1.2.4 <i>Typy zkoušek a měření na transformátoru</i>	16
1.3 MOŽNOSTI SPÍNÁNÍ TRANSFORMÁTORU PŘI MĚŘENÍ ZKRATU	17
1.3.1 <i>Stykač</i>	17
1.3.2 <i>Elektromagnetické relé</i>	17
1.3.3 <i>Solid state relé (SSR)</i>	18
1.4 JIŠTĚNÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	19
1.4.1 <i>Proudová ochrana</i>	19
1.4.2 <i>Napěťová ochrana (bleskojistka)</i>	23
2 TVORBA VÝROBKU	24
2.1 VÝBĚR VHODNÝCH SOUČÁSTEK	24
2.2 FOTODOKUMENTACE TVORBY VÝROBKU	26
3 MĚŘENÍ NA VÝROBKU	29
3.1 SCHÉMA MĚŘENÍ.....	29
3.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	30
3.2.1 <i>Měření napětí na krátko u_k</i>	30
3.2.2 <i>Měření charakteristik na prázdno a na krátko</i>	30
3.2.3 <i>Měření zapínacího proudu na prázdno a na krátko</i>	32
3.3 VÝPOČTY	33
3.3.1 <i>Výpočet napětí na krátko</i>	33
3.3.2 <i>Výpočet parametrů prvků náhradního schématu při měření na prázdno</i>	33
3.3.3 <i>Výpočet parametrů prvků náhradního schématu při měření na krátko</i>	33
3.3.4 <i>Přehled vypočtených hodnot (parametry transformátoru)</i>	34
3.4 VÝSTUP Z MĚŘENÍ.....	35
3.5 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	36
4 TVORBA ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	37
MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU NA PRÁZDNO A NA KRÁTKO (PARAMETRIZACE) A MĚŘENÍ ZAPÍNACÍHO	
PROUDU.....	37
5 ZÁVĚR.....	43
6 LITERATURA.....	44
SEZNAM PŘÍLOH	45
PŘÍLOHY.....	46

Seznam použitých značek a symbolů

b	Šířka	(m)
c	Měrné teplo	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
E	Modul pružnosti	(Pa)
f	frekvence	(Hz)
h	Tloušťka	(m)
i	okamžitá hodnota proudu	(A)
I_1	Efektivní hodnota proudu na primární straně	(A)
I_{21}	Efektivní hodnota proudu na sekundární straně	(A)
I_N	Jmenovitá hodnota proudu	(A)
I_{ZK}	Zkratový proud	(A)
I_D	Dynamický zapínací proud	(A)
I_{TAV}	Tavný proud pojistky	(A)
I_p	Očekávaný proud	(A)
I_0	Proud na prázdno	(%)
l	Délka	(m)
L	Indukčnost	(H)
N	Počet závitů	(-)
p	Převod	(-)
P_{CH}	Chladicí povrch	(m ²)
ΔP_k	Ztráty na krátko	(W)
ΔP_0	Ztráty na prázdno	(W)
q	Teplo	(J)
R_v	Odpor vinutí	(Ω)
R_1	Odpor vinutí na primární straně	(Ω)
R_{21}	Odpor vinutí na sekundární straně	(Ω)
R_2'	Odpor sekundárního vinutí bez respektování převodu transformátoru	(Ω)
R_{FE}	Odpor, který reprezentuje ztráty v železe	(Ω)
S_N	Jmenovitý výkon transformátoru	(VA)
S	Průřez vodiče	(m ²)
S_{PL}	Plocha	(m ²)
T	Teplota	(K)
T_0	Teplota okolí	(K)
t_v	Čas tavení	(s)
t	Čas	(s)
U	Efektivní hodnota napětí	(V)
U_N	Jmenovitá hodnota napětí	(V)
U_i	Indukované napětí	(V)
U_k	Napětí na krátko	(V)
$u_{k\%}$	procentní napětí na krátko	(%)
V	Objem tělesa	(m ³)

X_{σ}	Rozptylová reaktance	(Ω)
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance na primární straně	(Ω)
$X_{21\sigma}$	Rozptylová reaktance na sekundární straně	(Ω)
X_{μ}	Magnetizační reaktance	(Ω)
Z_N	Jmenovitá impedance	(Ω)
Z_k	Impedance na krátko	(Ω)
$Z_{k\%}$	Impedance na krátko	(%)
α_0	Součinitel přestupu tepla z povrchu do okolí	($W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$)
Δy	Průhyb	(m)
ΔP_{FE}	Ztráty na prázdno	(W)
Φ	Magnetický tok	($m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$)
$\cos \varphi$	Účíník	(-)
$\cos \varphi_k$	Účíník na krátko	(-)
$\cos \varphi_0$	Účíník na prázdno	(-)
ϑ	Oteplení	(K)

Seznam ilustrací

OBR. 1 A: JEDNOFÁZOVÝ JÁDROVÝ TRANSFORMÁTOR; B: JEDNOFÁZOVÝ PLÁŠŤOVÝ TRANSFORMÁTOR [2]	12
OBR. 2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [1,3]	12
OBR. 3 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NA PRÁZDNO [3]	13
OBR. 4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NA KRÁTKO [3]	14
OBR. 5 PRŮBĚH ZAPÍNACÍHO PROUDU [4]	15
OBR. 6 POROVNÁNÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU S REMANENCÍ A BEZ NÍ [4]	15
OBR. 7 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU [5]	16
OBR. 8 A: ZNÁZORNĚNÍ FUNKCE STYKAČE [7]; B: STYKAČ KANLUX KMC-20-11 2p [8]	17
OBR. 9 A: ZNÁZORNĚNÍ FUNKCE ELMAG. RELÉ [7]; B: RELÉ 230VAC FIRMY FINDER [9]	18
OBR. 10 A: SSR S OBVODEM PRO SPÍNÁNÍ V NULE [10]; B: RM1E23V25 [11]	18
OBR. 11 ZNÁZORNĚNÍ PRŮHYBU BIMETALU	20
OBR. 12 VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA JISTIČE [12]	20
OBR. 13 A: OTEVŘENÝ JISTIČ [13]; B: JISTIČ 32A JEDNOFÁZOVÝ EATON PL7-32/1/B [14]	21
OBR. 14 TAVNÁ CHARAKTERISTIKA ETI-D02/25A 25 A 400 V GL/GG E18 ETI [15]	22
OBR. 15 MĚŘÍCÍ PULT V LABORATOŘI	24
OBR. 16 ZVOLENÝ JISTIČ	25
OBR. 17 A: ZVOLENÝ 3F STYKAČ B: ZVOLENÉ SPÍNACÍ TLAČÍTKO	25
OBR. 18 UMÍSTĚNÍ TRANSFORMÁTORU NA DESCE	26
OBR. 19 NÁHLED UMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK NA DESKU	26
OBR. 20 PŘIVRTÁNÍ DIN LIŠTY A TLAČÍTKA	26
OBR. 21 A: UMÍSTĚNÍ KONTAKTŮ; B: ELEKTRICKÉ ZAPOJOVÁNÍ	27
OBR. 22 ELEKTRICKÉ ZAPOJOVÁNÍ PŘÍDRŽNÉHO KONTAKTU STYKAČE	27
OBR. 23 ŘEZ DESKY A UMÍSTĚNÍ NOŽEK	27
OBR. 24 POHLED NA FINÁLNÍ PŘÍPRAVEK NA MĚŘENÍ	28
OBR. 25 NEJEDNODUŠŠÍ SCHÉMA NA MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU NA KRÁTKO[1]	29
OBR. 26 POUŽITÉ SCHÉMA, ZE KTERÉHO BUDE VYCHÁZET PŘÍPRAVEK	29
OBR. 27 NÁHLED ZAPOJENÍ PŘÍPRAVKU	29
OBR. 28 MĚŘENÍ NAPĚTÍ NA KRÁTKO	30
OBR. 29 ZAPOJENÍ NA MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY NA KRÁTKO. PŘI MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY NA PRÁZDNO SE VYTÁHNUL MODRÝ DRÁTEK NA SEKUNDÁRU TRANSFORMÁTORU.	30
OBR. 30 POMOCNÝ AUTOTRANSFORMÁTOR NA NAPÁJENÍ SO PŘÍPRAVKU	31
OBR. 31 VLEVO JE MĚŘÍCÍ KARTA A VPRAVO PTP	31
OBR. 32 NÁHLED NA PTP	32
OBR. 33 ZAPOJENÍ PŘI MĚŘENÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU	32
OBR. 34 NÁHLED DO ROZHRANÍ NI LABVIEW PŘI MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY NA KRÁTKO	35
OBR. 35 NÁHLED DO ROZHRANÍ NI LABVIEW PŘI MĚŘENÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU NA PRÁZDNO	35
OBR. 36 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	38
OBR. 37 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [3]	39

Seznam tabulek

TABULKA 1 PŘEHLED PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORU	34
TABULKA 2 NAMĚŘENÉ HODNOTY NA PRÁZDNO	40
TABULKA 3 NAMĚŘENÉ HODNOTY NA KRÁTKO	40
TABULKA 4 VÝSLEDNÉ HODNOTY PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU TRANSFORMÁTORU	42

Úvod

V dnešní době jsou transformátory základním a velmi důležitým elektrickým strojem používaným na celém světě k celému spektru účelů, jenž jsou od transformátory obrovských výkonů v přenosové soustavě, přes distribuční transformátory středních výkonů v distribuční síti k zákazníkům či továrnám po transformátory na malé napětí, které se mohou využívat v laboratořích uvnitř stabilizovaných zdrojů napětí.

Mým záměrem této bakalářské práce bylo vytvořit přípravek do laboratoře na VŠB-TUO, kdy si studenti rychlým změřením mohou vyzkoušet parametrizovat jednoduchý transformátor, to znamená provést měření na krátko a na prázdno. Také mým záměrem bylo dát studentům možnost bez delší přípravy v laboratoři díky přípravku možnost si změřit dynamický zapínací proud, kdy budou transformátor zapínat do stavu na prázdno a stavu na krátko.

Pro splnění tohoto záměru jsem v teorii rozebral základní typy transformátorů, jejich konstrukci, základní rovnice, které souvisí s transformátory a různé provozní stavy. Kvůli tomu, že jsem chtěl, aby na přípravku se dali měřit přechodné děje při zapínání, tak byla vysvětlena povrchově teorie k běžným typům chránění transformátorů přes nadproudem a zkratovým proudem a možnosti sepnutí.

V praktické části jsem provedl návrh přípravku a provedl jeho realizaci s následným měřením, zda splňuje, že se na něm dá měřit to, co bylo mým záměrem měřit a potom zadat jako laboratorní úlohu.

1 Teorie

1.1 Transformátory, konstrukce, jejich funkce a místo v síti

Transformátor je netočivý elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Jako každý elektrický stroj musí respektovat hlavně tyto 3 zákony: zákon o elektromagnetické indukci, zákon akce a reakce a zákon zachování energie.

1.1.1 Funkce transformátoru v síti

Funkce transformátoru jakožto netočivého stroje je transformace napětí a proudu. Používají se na oddělení obvodů s jinou napěťovou hladinou. V energetické síti se využívá jednoduché transformace hladiny střídavého napětí.

V elektrárně se vyrobená elektrická energie musí transformovat na vhodnou hladinu pro přenos na velké vzdálenosti. Kdyby se netransformovala, byly by kvůli velmi vysokým proudům potřeba velkých průřezů vodičů. K tomu slouží energetické transformátory. V ČR se používá třífázová energetická soustava. To znamená, že u každé elektrárny je buď třífázový transformátor nebo tři jednofázové. V praxi je jednodušší mít čtyři jednofázové transformátory u elektráren. Tři z nich jsou zapojené a jeden je záložní. Průvodní náklady jsou větší, ale při poruše je jednodušší zapojit náhradu než vyměňovat rozměrnější třífázový transformátor.

V přenosové soustavě ČR se za přenosové hladiny napětí považují hodnoty 110kV, 220kV a 400kV. Jakmile se dorazí k oblasti distribuce, tak se hodnota napětí zmenší, k tomu slouží např. distribuční transformátor 110kV/22kV.

1.1.2 Rozdělení, konstrukce a princip transformátoru

Transformátor můžeme rozdělovat podle více parametrů:

1. Podle počtu fází
 - a. Jednofázový
 - b. Vícefázový
2. Podle sestavení magnetického obvodu:
 - a. Plášťový
 - b. Jádrový
3. Dále to může být podle druhu chlazení:
 - a. Olejový
 - b. Vzduchem chlazený
4. Typ určení:
 - a. Oddělovací
 - b. Distribuční
 - c. Regulační (autotransformátory)
 - d. Svařovací
 - e. Jistící
 - f. Měřicí

„Transformátor je založen na principu elektromagnetické indukce. Přiložíme-li na svorky vstupního vinutí střídavé napětí, pak tímto vinutím proteče proud, který vyvolá v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok Φ .“ [1]

Elektrický obvod se skládá z primárního a sekundárního vinutí, které je vyráběno běžně z mědi či hliníku. Hliník se využívá hojně u transformátoru nejvyšší výkonů. Tyto vinutí jsou od sebe galvanicky oddělená. Strana transformátoru s vyšším napětím se vždy označuje vn . Ta má vyšší počet závitů, ale drát, ze kterých jsou závity tvořeny mají menší průřez než strana s nižším napětím. Je to dáno menším proudem, který protéká na této straně transformátoru. Strana transformátoru s nižším napětím nn má méně závitů s větším průřezem drátu na větší proudy. Nejdůležitější údaj na štítku každého transformátoru jsou hladiny napětí, na které je určen. To se vyznačuje vždy jako vn/nn .

Magnetický obvod se skládá od sebe izolovaných trafoplechů. Ty jsou vyráběny v tloušťce 0,5mm nebo 0,35mm. Tyto plechy jsou válcované za studena, abychom mohli nejlépe ovlivnit trasu vířivých proudů, a tak omezit ztráty v železe. Rozlišujeme transformátory podle magnetického obvodu na plášťové a jádrové, jak lze vidět na obr. 1.[1]

Mechanická konstrukce transformátorů může být různá, podle jeho určení či požadavků zákazníka. Ta může zahrnovat od železničních kol po hák na zachycení pro jeřáb při manipulaci. V tom případě musí být uvedena na štítku hmotnost transformátoru.

Jednofázové transformátory mohou být plášťové nebo jádrové. Také mohou mít vyvedený střed kvůli regulaci (autotransformátory).

Třífázové transformátory mohou být také jádrové či plášťové. Takové transformátory jsou často využívány v distribuční části sítě. Tyto transformátory lze vytvořit dvěma způsoby a každá varianta má své pro i proti:

1. Tři jednofázové transformátory

- + Doprava – hmotnost a rozměry jsou menší
- + Nezávislé magnetické obvody – magnetické pole transformátorů se navzájem neovlivňuje, to znamená menší ztráty
- Spotřeba materiálu – celková hmotnost a potřeba materiálu je větší
- Cena

Tato varianta se používá u elektráren a důležitých přenosových uzlů, kdy porucha jednoho transformátoru nevyřadí místo z provozu a zapojí se záloha. Je to varianta, při které se snaží minimalizovat hlavně výpadkům sítě.

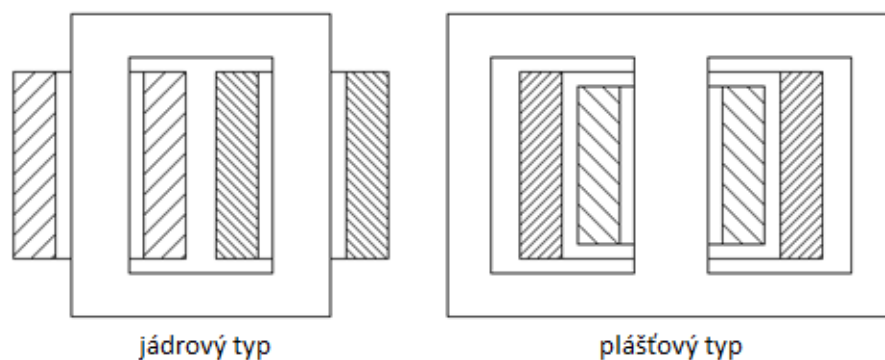
2. Třífázové transformátory

- + Cena – levnější než mít tři jednofázové transformátory
- + Hmotnost – celková hmotnost je menší
- Závislost magnetických obvodů – magnetická pole se ovlivňují, a tak nám vznikají větší ztráty
- Doprava – velké rozměry těchto transformátorů

Třífázové transformátory jsou běžné používané u továren a závodů. Také v přenosové a distribuční síti. Buď sloupky mohou být vedle sebe anebo, když je možnost, tak je postavit do kružnice, kdy ramena budou o 120° posunutá a s prostředním sloupkem uprostřed. Prostředním sloupkem teoreticky bude protékat magnetický tok hodnoty nula. Tak se omezí nesymetrie magnetického obvodu.

Transformátory převádějí podle těchto poměrů:

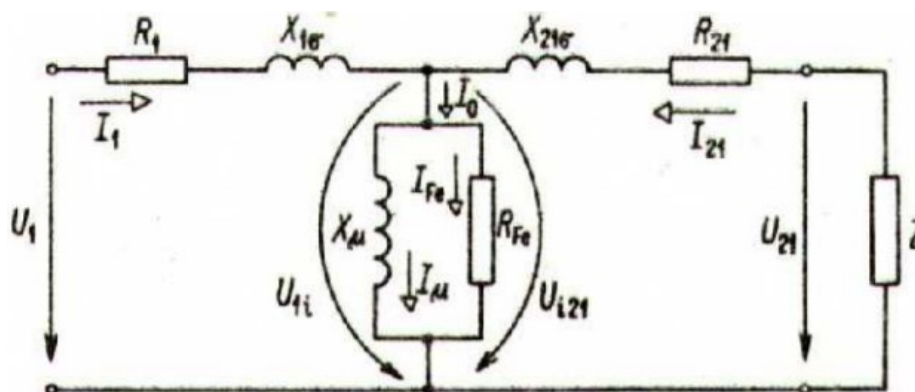
$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \cong \frac{I_{21}}{I_1} \quad (1)$$



Obr. 1 A: jednofázový jádrový transformátor; B: jednofázový plášťový transformátor [2]

1.1.3 Náhradní schéma transformátoru

Při výpočtech a simulacích musíme použít teoretický model transformátoru, který má několik zásadních chyb. Za prvé se jedná o posun fáze, ke kterému dochází. Za druhé v náhradním schématu není primární a sekundární vinutí galvanicky odděleno, což je důležitá vlastnost transformátoru. Taký je potřeba přepočítat vstupní a výstupní veličiny, zda chceme znát proudy a napětí na vstupním i výstupním vinutí. Toto schématické značení transformátoru hlavně slouží k rozboru provozních stavů.



Obr. 2 náhradní schéma transformátoru [1,3]

Schéma můžeme rozdělit na příčné a podélné vedení.

V podélném vedení máme schématické prvky, které simulují vinutí. Jsou to činné odpory vinutí, vstupního i výstupního R_v a rozptylové reaktance vinutí X_σ . Tato reaktance nám říká, že ne všechny magnetický tok se uzavírá v magnetickém obvodu, a tak ho musíme respektovat i v tomto náhradním schématu.[1]

Příčná větev nám popisuje magnetický obvod. V něm najdeme odpor, který vyjadřuje ztráty v železe R_{Fe} . Tím jsou myšleny ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Poté poslední prvek ve schématu je magnetizační reaktance X_μ . Ta nám vyjadřuje možnou konečnou magnetickou vodivost magnetického obvodu.[1]

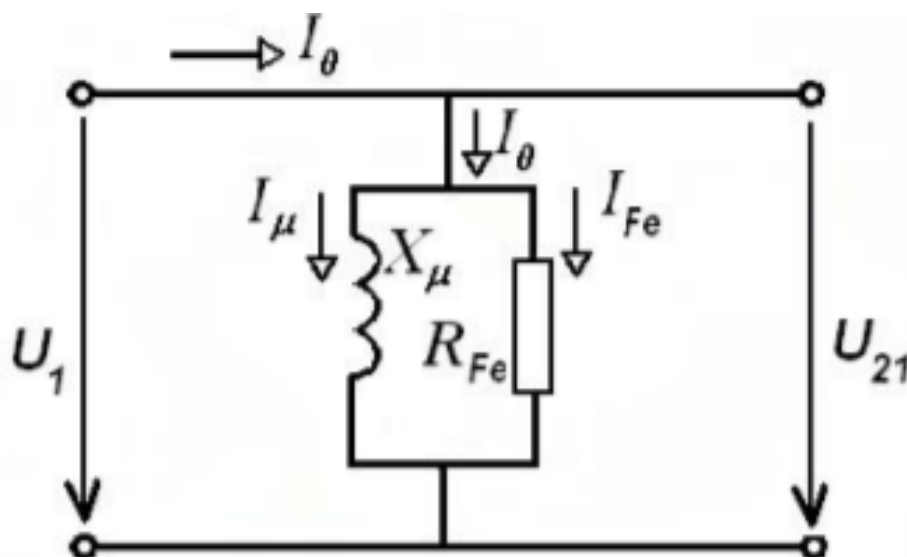
1.2 Stavy na transformátoru a jejich měření

Transformátor má tři pracovní stavy, a toť je normální chod a poté chod na prázdno či chod na krátko. Poslední dva chody jsou nežádoucí stavy, které nám negativně ovlivňují chod sítě a nejsou žádoucí. Všechny stavy nastanou po odeznění přechodových jevů.

1.2.1 Chod a náhradní schéma transformátoru na prázdno a na krátko

Stav na prázdno je definován rozpojenými svorkami na výstupní straně vinutí. V sekundárním obvodu neprochází žádný proud I_{21} . [6] Tím pádem se nám v náhradním schématu ztratí parametry výstupního vinutí. U velkým transformátoru lze zanedbat i podélné parametry na straně vstupní, jelikož proud na prázdno bude velmi malý. U nejmenších transformátoru má proud na prázdno I_0 až hodnotu 40 % I_N . Pro transformátory, které mají výkon ve stovkách VA se jedná o hodnotu proudu na prázdno kolem 10 % I_N . U největších transformátoru se jedná o hodnotu pod 1 % I_N . Lze tedy říct, že proud na prázdno je dán kvalitou magnetického obvodu a velikostí transformátoru.

Důležité je také zohlednit účinník na prázdno. Ten se pohybuje od 0,1 do 0,7 v závislosti na ztrátách na prázdno ΔP_{FE} a proudu na prázdno I_0 . Pokud je účinník transformátoru malý, tak odběr jalové energie přetěžuje síť. To způsobuje ztráty a úbytek napětí na vedení.



Obr. 3 náhradní schéma transformátoru na prázdno [3]

Stav na krátko je dán spojenými svorkami na výstupním vinutí bez jakékoliv zátěže. Na výstupu lze v tomto případě zaznamenat nejvyšší možnou hodnotu proudu neboli zkratový proud. Tento proud se musí měřit sníženým napětím na krátko U_k . Je to důležitý štítkový údaj, který je uvedený vždycky. Transformátor se nesmí nikdy měřit při jmenovitém napětí, jelikož by docházelo k tepelnému namáhání a možnému následnému zničení. Při napětí na krátko prochází transformátorem na obou stranách vinutí proud jmenovitý I_N . Nejčastěji se U_k udává v procentech. [1]

Dalším důležitým parametrem při transformátoru ve stavu na krátko je jeho impedance na krátko Z_k . Ta se nejčastěji udává v procentech jako $Z_k\%$. Je důležité si uvědomit, že platí:

$$Z_{k\%} = \frac{Z_k}{Z_N} = \frac{\frac{U_k}{I_N}}{\frac{U_N}{I_N}} = \frac{U_k}{U_N} = u_{k\%} \quad (2)$$

Díky hodnotě impedance na krátko lze určit samotný zkratový proud I_{ZK} , který protéká obvodem při jmenovitém napětí U_N . Tento stav může nastat pouze při poruše. Zkratový proud je tedy dán vztahem:

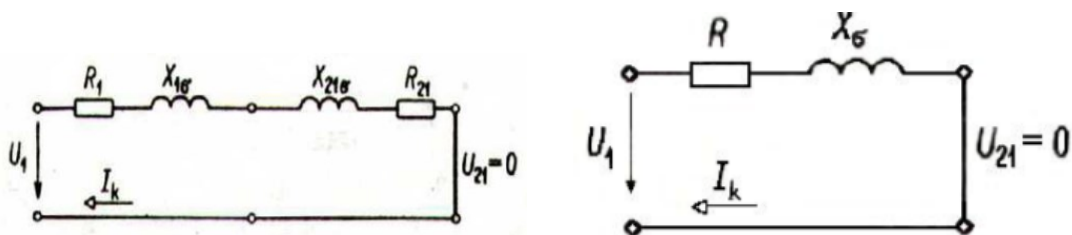
$$I_{ZK} = \frac{U_{1N}}{Z_K} = \frac{U_{1N}}{\frac{U_k}{I_{1N}}} = \frac{I_{1N}}{U_k} = \frac{I_{1N}}{Z_k} \quad (3)$$

Nebo také lze I_{ZK} určit:

$$\frac{U_k}{U_{1N}} = \frac{I_{1N}}{I_{ZK}} \rightarrow I_{ZK} = I_{1N} \cdot \frac{U_{1N}}{U_k} = \frac{S_N}{U_k} \quad (4)$$

Hodnota I_{ZK} dosahuje hodnot 7 až 25násobku hodnot I_N podle velikosti a druhu transformátoru.[1]

Účinník na krátko $\cos \varphi_k$ je dán podílem činné a jalové složky Z_k . Hodnota se bude pohybovat od 0,7 do 0,95

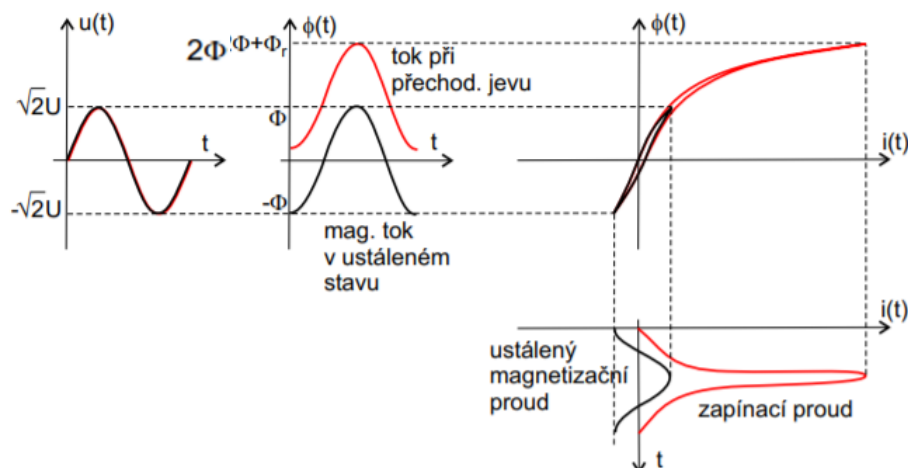


Obr. 4 náhradní schéma transformátoru na krátko [3]

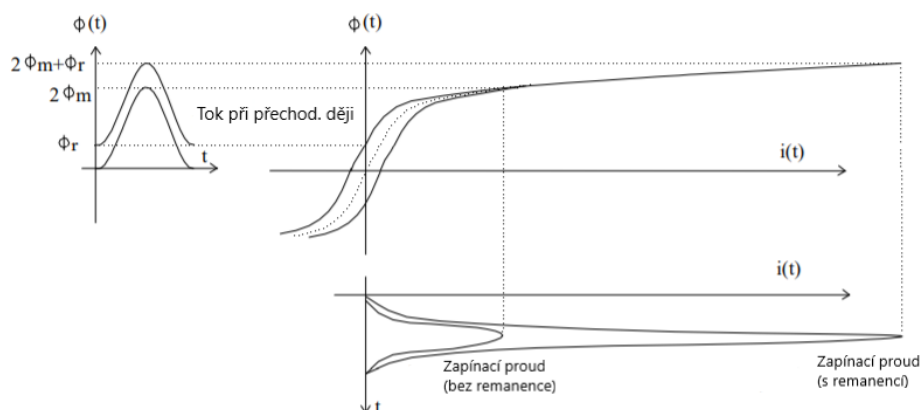
1.2.2 Průběh zapínacího proudu při stavu na prázdko

Jestliže zapínáme nezatížený jednofázový transformátor v ideálním obvodu, to znamená zanedbáme odpor vinutí a ztráty v železe, tak potom se proud zpožďuje za napětím o 90° . Jestli je zapnut transformátor, když je napětí v maximu, tak potom tok Φ v magnetickém obvodu prochází nulou, jelikož je zpožděn o 90° za napětím a nastane ustálený stav. V tomto případě není tedy důvod pro vznik přechodného děje a proud se objeví jako při ustáleném stavu.

Pakliže nastane zapnutí při průchodu napětí nulou, a neuvažujeme-li remanenci, tak potom magnetický tok by měl být v čase $t = 0$ maximální. Jenže skutečný magnetický tok je roven nule, takže vznikne stejnosměrná složka, která celkový magnetický tok zvětšuje. Jestliže k tomu všemu zohledníme i remanentní magnetický tok, potom se může magnetický tok zmenšit, či zvětšit několikanásobně. K zvláště velkému zvětšení magnetického toku dochází u transformátoru, co mají magnetický obvod z přepátovaných plechů. Čím novější transformátor a kvalitnější plechy, tím horší je zapínací proud.



Obr. 5 Průběh zapínacího proudu [4]



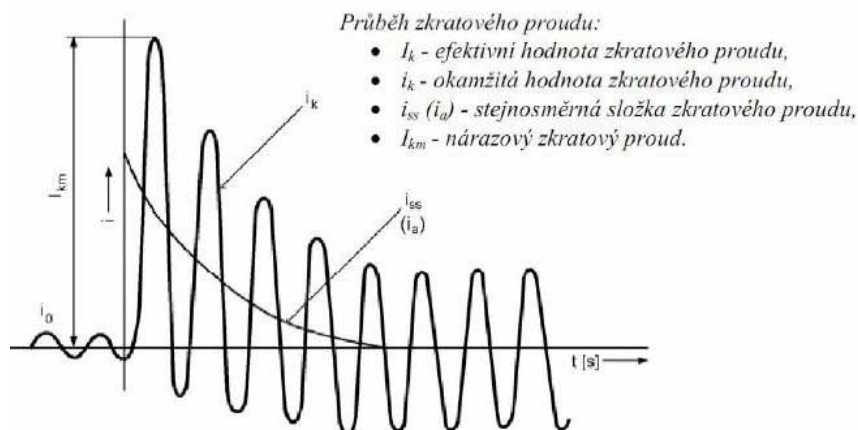
Obr. 6 Porovnání zapínacího proudu s remanencí a bez ní [4]

1.2.3 Průběh zkratového proudu

Při vzniku zkratu na transformátoru dochází k přechodnému ději, který trvá několik period, než dojde k jeho ustálené hodnotě danou rovnicí (3) nebo (4). Tento přechodný děj se skládá z ustálené složky a stejnosměrné složky.

Střídavá složka je dána hodnotou napětí na vstupu U_1 transformátoru a impedancí nakrátko Z_k při vzniku poruchového stavu. Čím větší transformátor máme, tím pomaleji se bude dostávat tento aperiodický průběh do ustáleného stavu. Je to dáno poměrem $\frac{L_{1k}}{R_{1k}}$. [1]

Stejnosečná složka bude největší, stejně jako u zapínacího proudu, když bude zrovna napětí procházet nulou, a tudíž vznikne přechodový děj s maximálním možným zkratovým proudem. [1]



Obr. 7 Průběh zkratového proudu [5]

1.2.4 Typy zkoušek a měření na transformátoru

Měření na netočivých strojích je sám o sobě obor, který je stejně obsáhlý jako obor zabývající se měřeními na strojích točivých. Ačkoli odpadají jevy a měření spojená s rotorem, tak se nám objevují jevy a měření, se kterými musíme u transformátoru počítat. Jedná se například o přepětí, které mohou dojít z vedení přímo na vinutí transformátorů. Poté například se musí měřit účinky zkratových poměrů.[6]

Na transformátoru se běžně provádějí tyto typové zkoušky:

- Měření odporu vinutí
- Kontrola spojení vinutí
- Určení převodu
- Měření na prázdko
- Měření na krátko
- Určení netočivé reaktance
- Určení účinnosti
- Oteplovací zkouška
- Určení celkového úbytku napětí
- Izolační zkoušky
- Měření kapacit vinutí navzájem a proti nádobě
- Zkratová zkouška

Pořadí jednotlivých zkoušek je dáno zaběhnutou praxí či případně je dáno normou. V ČR ve velkých závodech se zkoušky provádějí většinou v tomto pořadí:

1. Měření odporu
2. Měření na krátko
3. Měření na prázdko
4. Zkouška rázová (pokud je předepsaná)
5. Zkouška (přiloženým) napětím z cizího zdroje
6. Zkouška závitové izolace zvýšeným napětím
7. Opakovaná zkouška na prázdko

Například dříve bylo dáno v sovětském svazu, že po zkoušce elektrické pevnosti izolace muselo být provedeno měření na prázdnou zvýšeným napětím, bez ohledu, zda již byla provedena před tím.[6]

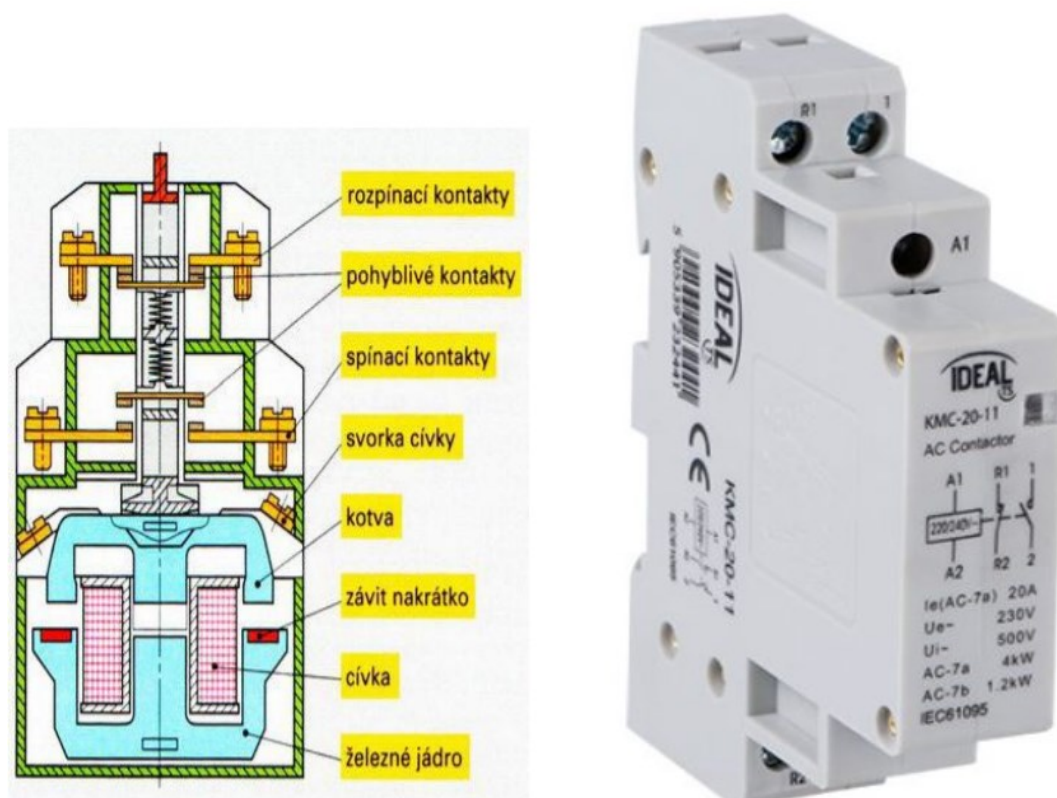
1.3 Možnosti spínání transformátoru při měření zkratu

1.3.1 Stykač

Stykač je elektromagnetická součástka, která mají zapínací mechanismus na pneumatický, váčkový nebo elektromagnetický princip.[16] Dále bude popisován jen stykač, který má zapínací mechanismus na principu elektromagnetickém.

Skládá se ze dvou či tří základních obvodů. Obvodu řídicího tvořeného magnetem z měkkého feritu a kolem něj namotané cívky napojené na zdroj malého výkonu, jelikož na zmagnetizování stačí malý proud. Silový obvod se skládá se spínacích, rozpínacích či spínacích i rozpínacích kontaktů. Tedy maximálně čtyři pomocné kontakty. Kontakty u stykačů se používají pouze s čelním stykem.[16]

Jakmile projde cívkou proud, ten díky elektromagnetické indukci zmagnetizuje ferit, který přitáhne kotvu. Ta se hýbe po přísmce, a pohyblivými kontakty propojí kontakty spínací, které nám sepnou daný obvod. Po vypnutí řídicího obvodu přestane být kotva přitahována cívkou, a tak se díky síle pružiny vrátí do původního stavu, kde se rozpojí spínací obvod a může být sepnut pohyblivými kontakty obvod napojený na kontakty rozpínací.

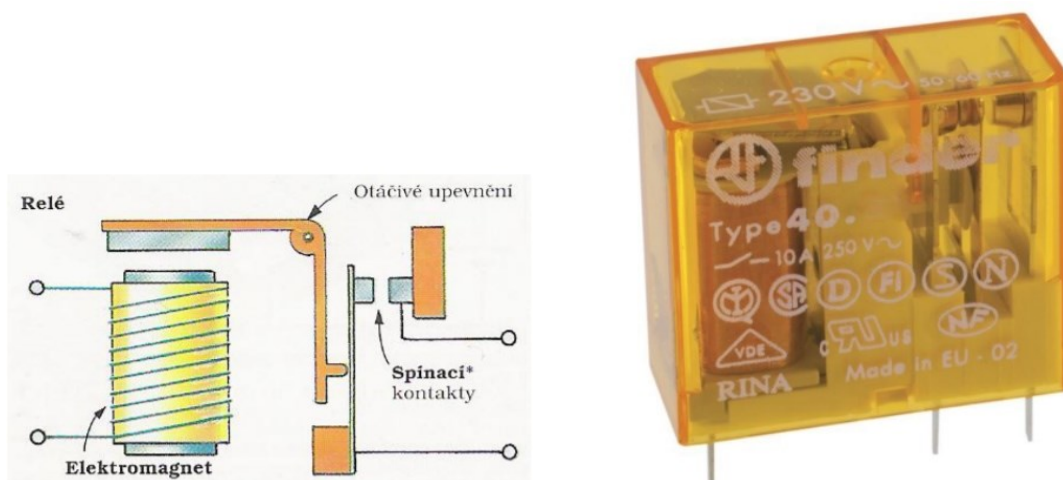


Obr. 8 A: Znáznornění funkce stykače [7]; B: Stykač Kanlux KMC-20-11 2p [8]

1.3.2 Elektromagnetické relé

Jeho princip je stejný jako u stykače. Spínací kontakty jsou od sebe a při průchodu proudem řídicím obvodem a přitažením kotvy se kotva přitáhne a silou přitlačí jeden spínací kontakt k tomu druhému. Po rozepnutí se kontakty rozpojí a mohou sepnout rozpínací pomocné kontakty, zda ho relé obsahuje.

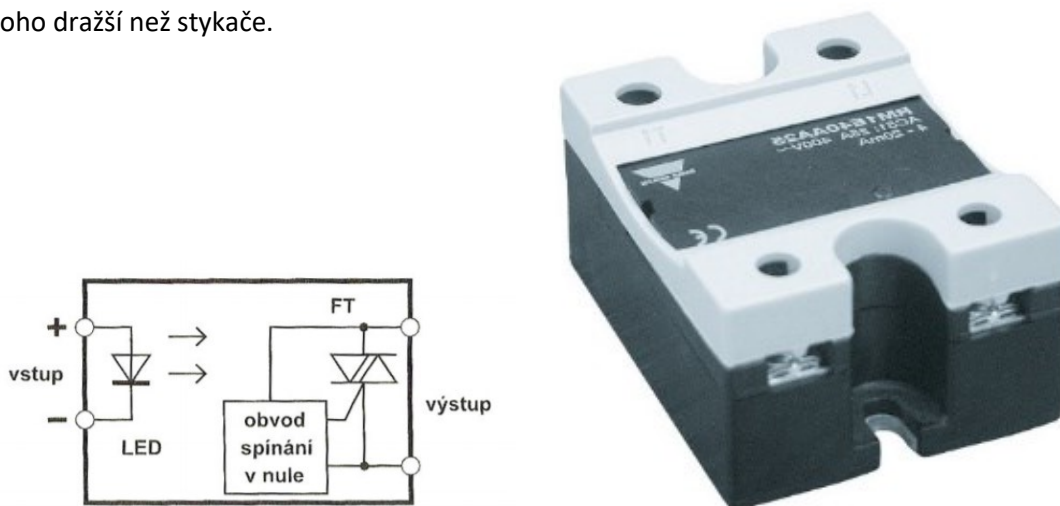
Výrobci často zaměňují pojmy stykač a elektromagnetické relé, ale největší rozdíl je ten, že stykač se používá pro velké proudy a elektromagnetické relé pro malé proudy. Oba tyto systémy mají své výhody v jednoduché, bezúdržbové konstrukci a minimálních ztrátách. Jejich nevýhoda je rychlost spínání, která je omezena mechanickými možnostmi součástek a nemožnost spínat v námi požadovaném okamžiku. V běžné praxi nejsou tyto nevýhody hodně omezující a jsou stále masově využívány.



Obr. 9 A: Znárodnění funkce elmag. relé [7]; B: Relé 230VAC firmy FINDER [9]

1.3.3 Solid state relé (SSR)

Solid state relé, nebo-li polovodičové relé je spínací prvek, který má nahradit v určitých aplikacích stykače a elektromagnetické relé. Neobsahuje žádné mechanické části, takže dokáže spínat a rozpínat o mnoho rychleji, nevydává žádný hluk a dokáže při měření například spínat v nule. Její nevýhoda může být potřeba chlazení při vyšších výkonech a větší ztráty. Dále jsou při vyšších potřebných parametrech o mnoho dražší než stykače.



Obr. 10 A: SSR s obvodem pro spínání v nule [10]; B: RM1E23V25 [11]

1.4 Jištění transformátorů

1.4.1 Proudová ochrana

1.4.1.1 Jistič

Jedná se snad o nejvíce rozšířený elektrický přístroj současnosti, který se nachází ve všech dnešních aplikacích. Od přípojníc rodinných domů a paneláků, přes průmyslové centra po pulty v laboratořích. Má dvě polohy vypnuto a jedno polohu zapnuto. Umí působit proti zkratům, ale hlavně i proti nadproudům, při kterých by ještě nezačala působit pojistka. Tyto nadproudy jsou nebezpečné nadbytečným teplem, které by se v chráněné oblasti akumulovalo, a to by mohlo způsobit škodu. Tento druh má vždy magnetické zhašení oblouku.[17]

Mechanismus se skládá ze zámku, volnoběžky a spouští. Spoušť zkratová funguje na principu elektromagnetickém. Kotva drží napnutou volnoběžku v poloze zapnuto. Při zkratu začne cívkou protékat zkratový proud, který zvýší intenzitu elektromagnetického pole. Magnetická síla je větší než síla pružiny, která drží kotvu na svém místě, a tak přitáhne kotvu k sobě. Natažená volnoběžka se vrátí do své původní polohy vypnuto. Oblouk je vehnán do zhašecí komory. Při nadproudu by tato spoušť nefungovala, a proto tam je ještě nadproudová spoušť tvořena bimetalem.[16] Pro jističe a pojistky platí stejná tepelná rovnice:

$$qVdt = cVd\vartheta + \alpha_0 P_{CH} \vartheta dt \quad (5)$$

Bimetal by měl ideálně být vytvořen s rozměry v poměru:

$$l : b : h \rightarrow 100 : 10 : 1$$

Existují čtyři různé metody, kterými lze ohřívat bimetal. Je to dáno různými velikostmi proudů, které mají jističe být schopné odbavit. Tyto typy ohřevu jsou:

- Napřímo – poruchový proud prochází přímo bimetalem. To se využívá u hodnot $I_N = 6-32$ A
- Kombinovaný ohřev – proud prochází přímo bimetalem, a kolem bimetalu je navíc topná spirála, aby se ohříval rychleji. Je to pro proudy do $I_N = 6$ A
- Nepřímý ohřev – proud protéká odporovou částí, která tepelně ovlivňuje bimetal. Proud až do $I_N = 250$ A
- Přímý ohřev, který je upraven transformátorem. MTA dá vždy maximálně 1 A nebo 5 A na sekundáru, je zkratuvzdorný. Využívá se BH charakteristiky, u které se použije saturačních hodnot.

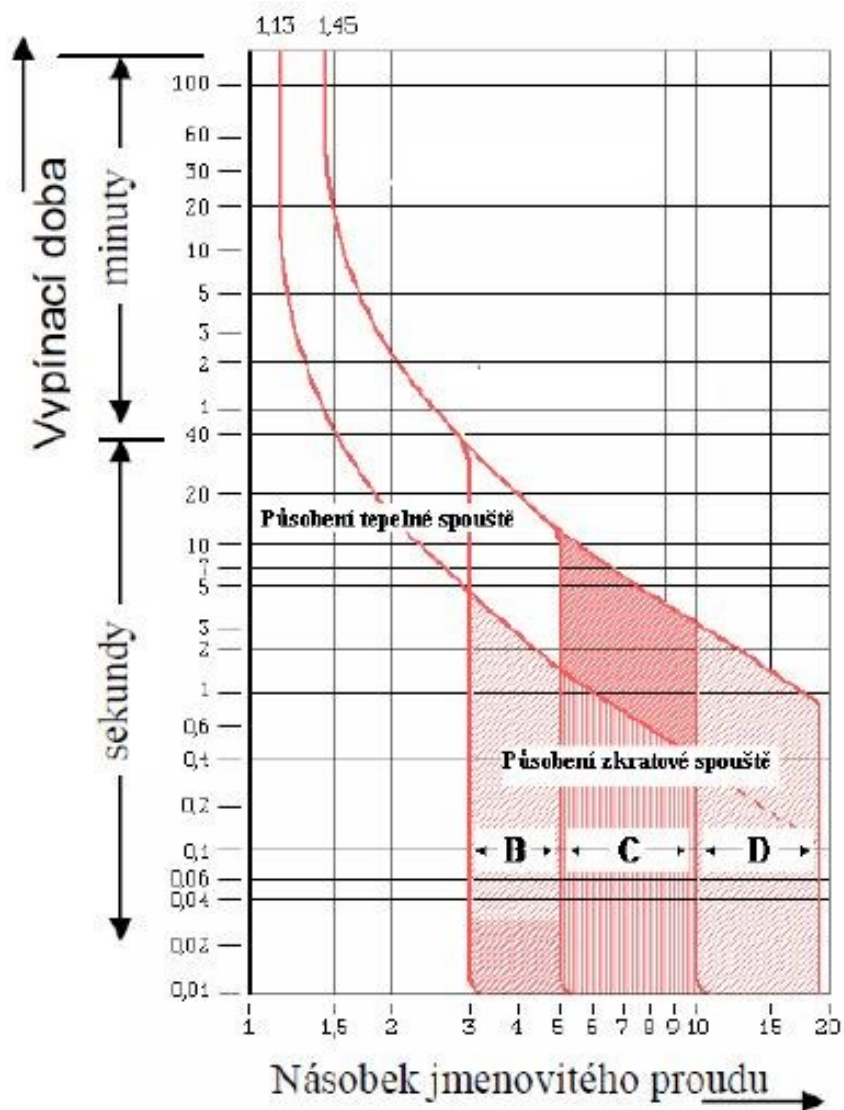
U dvojkovu lze vyjádřit průhyb:

$$\Delta y \approx \frac{(T - T_0) \cdot l \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{S_{PL} \cdot E} \quad (6)$$



Obr. 11 Znáznornění průhybu bimetalu

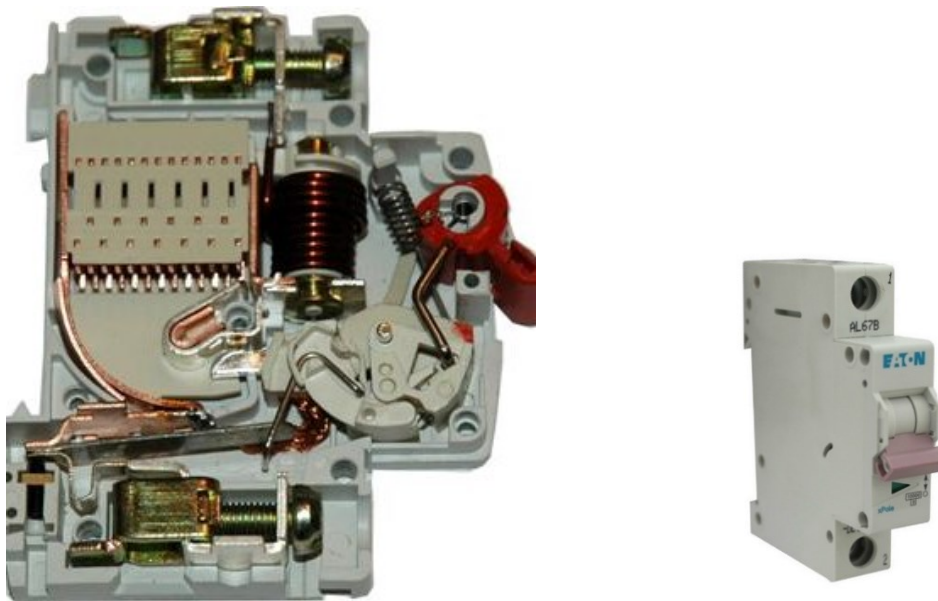
Je vždy důležité vybrat správnou pojistku podle její vypínací charakteristiky. Tato charakteristika se opět nepočítá, ale měří a výrobce dodává v katalogu vypínací charakteristiku přímo určitého typu jističe.



Obr. 12 Vypínací charakteristika jističe [12]

Kde každý jistič v jiné třídě má jinou funkci:

- B. Jistič tohoto typu se používají v běžných domácnostech a vedeních. Má zkratovou spoušť na již malý násobek I_N .
- C. Jističe tohoto typu se používají na stroje, co mají menší dynamický zapínací proud při zapnutí.
- D. Při tomto typu již mluvíme o motorech a dalších strojích, které mají běžně dynamický zapínací proud velikosti například až $7 \times I_N$ u asynchronních strojů.



Obr. 13 A: Otevřený jistič [13]; B: Jistič 32A jednofázový Eaton PL7-32/1/B [14]

1.4.1.2 Pojistka

Jedná se o nejjednodušší elektrický přístroj, který nemá žádné mechanicky pohyblivé části. Umí vypnout elektrický obvod pouze jednou, poté je potřeba jeho výměna. Je schopna vypnout velké přetížení a zkrat, a dokonce omezit velikost maximálního proudu.[17] Vypíná stejnosměrný a střídavý proud stejně.

Pojistka je tvořena nádobou, tavným drátem a výplní. Nádoba je vyrobena z keramiky nejvyšší jakosti. Tavný drát by měl být nejslabším místem v celém obvodu, který jistí. Nejčastěji je vyroben ze stříbra, cínu, mědi či pseudoslitin. Pseudoslitiny se používali dříve, dneska se používá metoda perforace pásu či procínování materiálu. Výplň je tvořena křemičitým pískem. Jakmile začne pojistkou protékat zvětšující se nadproud, tak se začne tavný drát vypařovat, čímž se vytvoří díky písku skleněná trubice, ve které se hasí oblouk zvětšující se vzdálenosti. Při konstrukci pojistky hledáme proud, při kterém se vodič začne tavit. Ten je dán rovnicí:

$$I_{TAV} \approx K \cdot S \cdot I^n \quad (7)$$

Kde:

- I^n je předvídaný proud.
- K je konstanta zahrnující v sobě teplotu tání, odpor na teplotě, skupenské teplo tání, elektrickou vodivost a další.

Na každé pojistce najdeme několik údajů, podle kterých určíme správnou pojistku pro naše potřeby. Jsou to:

- Jmenovitý proud
- Krajní proud
- Rychlost pojistky
- Vypínací proud (maximální)

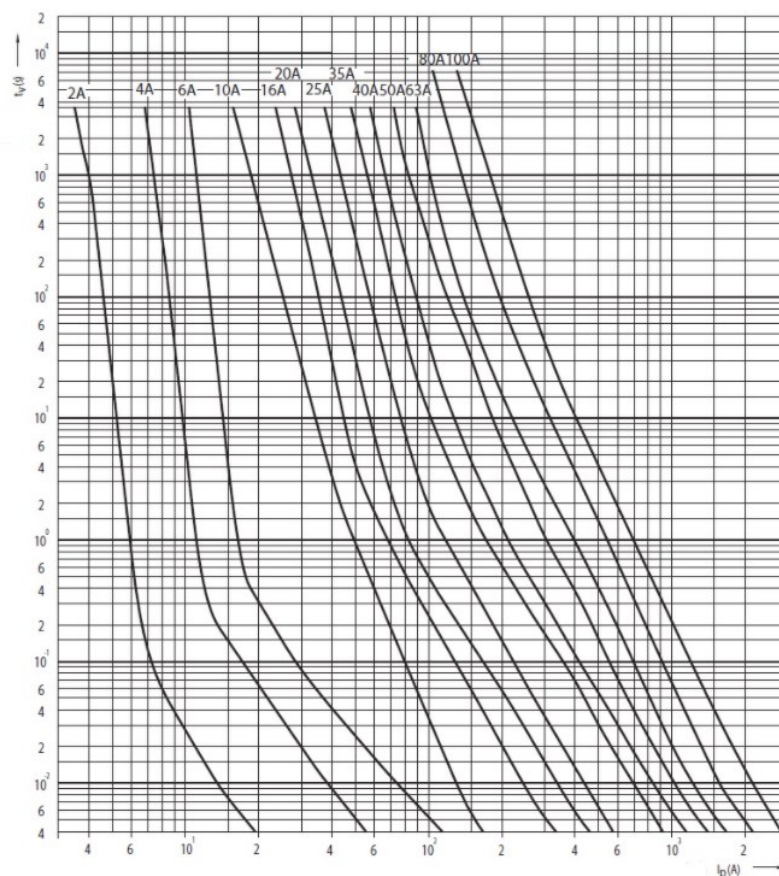
Rychlost pojistky nám určuje, kolik energie pojistka ještě propustí během působení do jištěné oblasti. To je dáno vztahem:

$$\int_0^{t_{VYP}} R \cdot i^2 dt \quad (8)$$

Pojistky můžeme rozdělit do několika kategorií, kde se každá hodí jinak:

- Normální
- Pomalé – využití u asynchronních motorů, kde zapínací proud trvá pouze krátkou dobu, tedy snesou krátké přetížení.
- Rychlé – mají uveden krajní proud na tělu nádoby.
- Rychlé pro jištění polovodičů

Při výrobě se vypínací charakteristika vždy měří, nepočítá se. Jedna se přesněji o charakteristiku doby tavení (tavná charakteristika).



Obr. 14 Tavná charakteristika ETI-D02/25A 25 A 400 V gL/gG E18 ETI [15]

1.4.2 Napěťová ochrana (bleskojistka)

Je důležité chránit síť proti přepětí, jelikož napětí na síti není nikdy konstantní. Může dojít k dočasným nebo trvalým přepětím. Ochrany by měli omezit přepětí a při tom by neměla způsobit zkrat na zařízení. Každá napěťová hladina má své nejvyšší provozní napětí, při kterém může ještě pracovat.[17] Jakmile se na vedení objeví přepětí, musíme chránit před jeho účinky připojena zařízení. K tomu slouží bleskojistky.

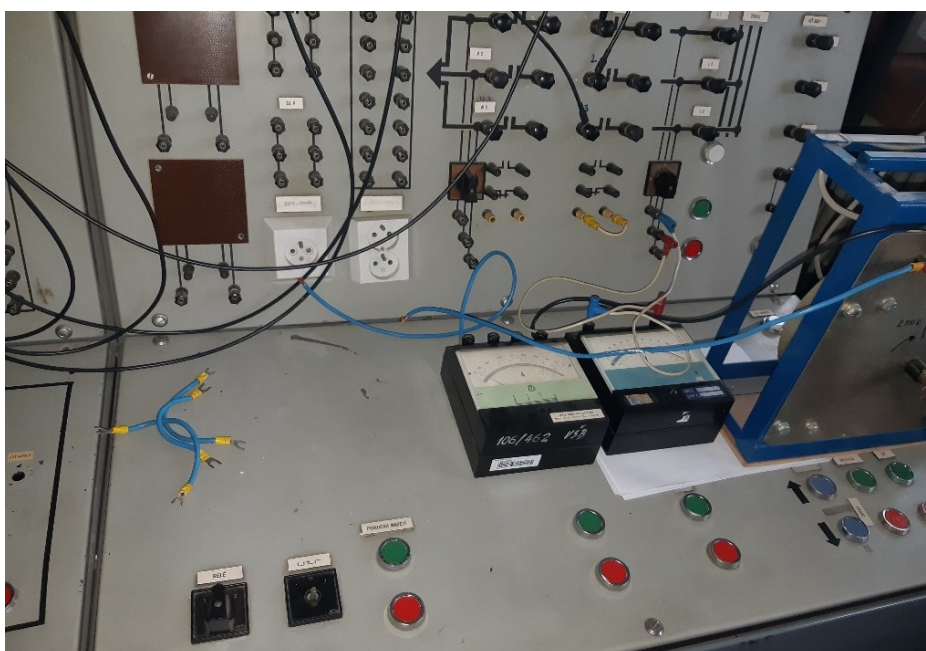
Nejčastěji jsou tvořeny dvěma jiskřišti, kdy jedno je připojeno na chráněné vedení a druhé k zemi. Při překročení zapalovacího (průrazného) napětí, na které je bleskojistka konstruována, začne na jiskřišti hořet oblouk a svede zkrat do země, aniž by zničilo chráněné zařízení.

2 Tvorba výrobku

2.1 Výběr vhodných součástek

Na tvorbu výrobku je potřeba zvolit součástky, které vydrží námi požadované parametry, nebudou zbytečně předimenzované, což by bylo neekonomicky výhodné, dále by to nebylo vhodné z rozměrových a hmotnostních důvodů. Neposledně by tyto součástky mohli způsobovat větší ztráty. Naopak při volbě poddimenzování součástek, může nastat, že nám obvod nevydrží a zničí se součástky.

Zdrojem pro silový obvod je síťové napětí o hodnotě $U_N = 230 \text{ V}$ s frekvencí $f = 50 \text{ Hz}$ dodávané prostřednictvím ovládacího pultu v laboratoři. Je to dáno tím, že při měření na krátko je potřeba použití napětí na krátko u_{1k} . To je uvedeno na štítku transformátoru. Pulty v laboratořích nám umožní regulaci. Při měření zapínacího proudu použijeme celé napětí U_1 . Pro řídicí obvod použijeme taky ovládací pult v laboratoři, abychom mohli navolit přesně takové napětí, které je požadované pro řídicí obvod stykače.



Obr. 15 Měřicí pult v laboratoři

Jištění, ač ideální by byla kombinace pojistky i jističe, tak v těchto laboratorních podmínkách pro univerzitu by se z ekonomického důvodu pojistka nevyplatila a musela by se po každém měření vyměnit. Tedy jištění bude probíhat jističem třídy C, ale nejlépe třídy D, jelikož než vypne, tak budeme moci dobře změřit a zaznamenat proud. Pro tyto účely jsem zvolil jistič třídy D na jmenovité napětí $U_N = 230 \text{ V}$, s jmenovitým proudem $I_N = 25 \text{ A}$. Přípravek chceme používat při měření různých transformátorů, jejichž výkon se pohybuje okolo $S_N = 1000 \text{ VA}$ s napětím na primárním vinutí $U_{1N} = 230 \text{ V}$. Z toho určíme jmenovitý proud transformátoru na primárním vinutí:

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_1} = \frac{1000}{230} = 4.348 \text{ A} \quad (9)$$

Hodnota zkratového proudu tedy na primárním vinutí by mohla nabývat teoreticky obvykle hodnot:

$$I_{ZK} = I_{1N} \cdot (10 \div 20) = 4,348 \cdot (10 \div 20) = 43,48 \div 86,96 \text{ A} \quad (10)$$

To znamená, že nadproudová ochrana jističe by měla být schopná vypnout zkrat při plném napětí, kdyby při měření některý student neměřil transformátor na krátko podle návodu při napětí na krátko U_k . Ve finále velikost zkratového proudu je dána rovnicí (3), či popřípadě (4), tedy je (pozn. K $U_k = 6,9V$ se došlo měřením, popsáném v kapitole 3):

$$I_{1ZK} = \frac{S_N}{U_k} = \frac{1000}{6,9} = 144,93A \quad (11)$$

Tím pádem by nám měl jistič v třídě D dát před vybavením jističe chvíli času na vykreslení průběhu zapínacího proudu.



Obr. 16 Zvolený jistič

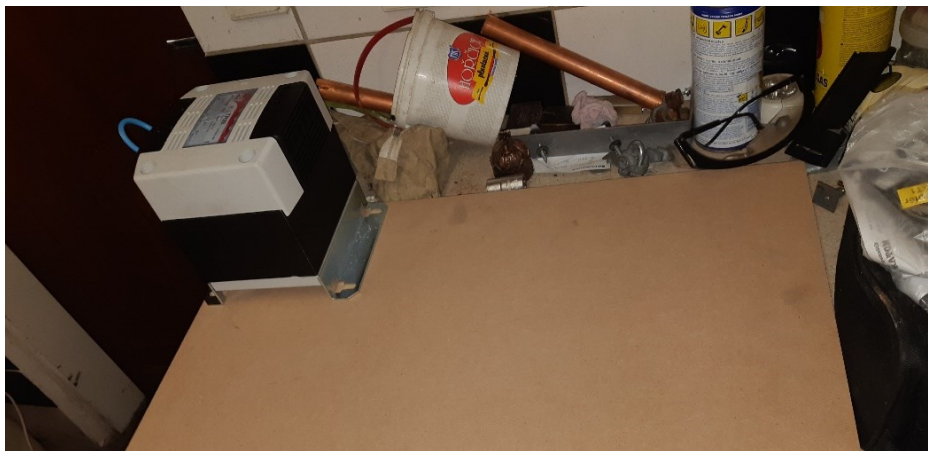
Na spínání by bylo ideální polovodičové relé s obvodem spínání v nule, jinak nazývané SSR (solid state relay). Z tří naznačených možností v teorii nám tato varianta umožní obvod jako jediná spínat v nule, což je nejdůležitější vlastnost u spínačů, kterou hledáme při tomto měření. Jeho jediná znatelnější nevýhoda jsou větší ztráty na tomto typu relé a také nemožnost spínat indukivní zátěže pod účinník $\cos \varphi = 0,5$ (záleží na daném modelu a informacích v katalogu). Nakonec byl zvolen stykač, jelikož dokáže spínat zátěže všeho druhu. Řídicí a silový obvod jsou oba konstruovány na jmenovité napětí $U_N = 230 V$. Z důvodu pracovního proudu stykače využiji při měření na tomto 1fázovém transformátoru 3fázový stykač kvůli paralelnímu rozložení proudů.

Na spínání ovládacího obvodu využiji klasické průmyslové tlačítko.



Obr. 17 A: zvolený 3f stykač B: Zvolené spínací tlačítko

2.2 Fotodokumentace tvorby výrobku



Obr. 18 Umístění transformátoru na desce



Obr. 19 náhled umístění součástek na desku



Obr. 20 Přivrtání DIN lišty a tlačítka



Obr. 21 A: Umístění kontaktů; B: Elektrické zapojování



Obr. 22 Elektrické zapojování přídržného kontaktu stykače



Obr. 23 Řez desky a umístění nožek



Obr. 24 Pohled na finální přípravek na měření

Prvně jsem umístil transformátor na kraj desky a upevnil ho vruty pomocí AKU vrtačky.

Poté jsem na desku umístil pro představu ostatní součástky, zda se mi na ní vejdou tak, jak jsem to chtěl.

Co jsem si ověřil, že mohu umístit součástky tak, jak jsem si představoval, přivrtal jsem kousek lišty, kterou jsem si zkrátil elektrickou pilkou s plátkem na železo. Dále jsem přivrtal tlačítku k desce. Nakonec jsem si předvrtal díry v místě, kde jsem chtěl umístit kolíkové kontakty a poté je tam vložil, stejně jako stykač s jističem na DIN lištu.

Jakmile jsem měl věci všechny upevněné na desce, tak jsem začal vše elektricky propojovat. Odstříhl jsem si vhodné délky drátu a udělal koncovky dle toho, kde měl daný konec přijít. Jako poslední jsem zapojil přídržný kontakt stykače.

Následujíc jsem desku uřezal elektrickou pilkou s plátkem na dřevo, jelikož na větší polovině desky nebylo nic osazeno.

Potom jsem vzal přípravek ven kvůli vysokému prášení a ohobloval stranu, kterou jsem minule řezal. Toto bylo z estetického hlediska, jelikož jsem řez neprovedl moc kvalitně.

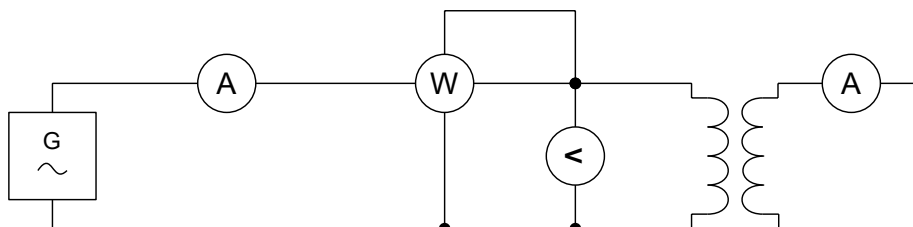
Nakonec jsem využil brzdy z pračky jako nožky pod desku, jelikož kolíkové kontakty přečnívali na druhou stranu a nebylo to moc stabilní.

Hotový přípravek lze potom vidět na obtázku 23 a 24.

3 Měření na výrobku

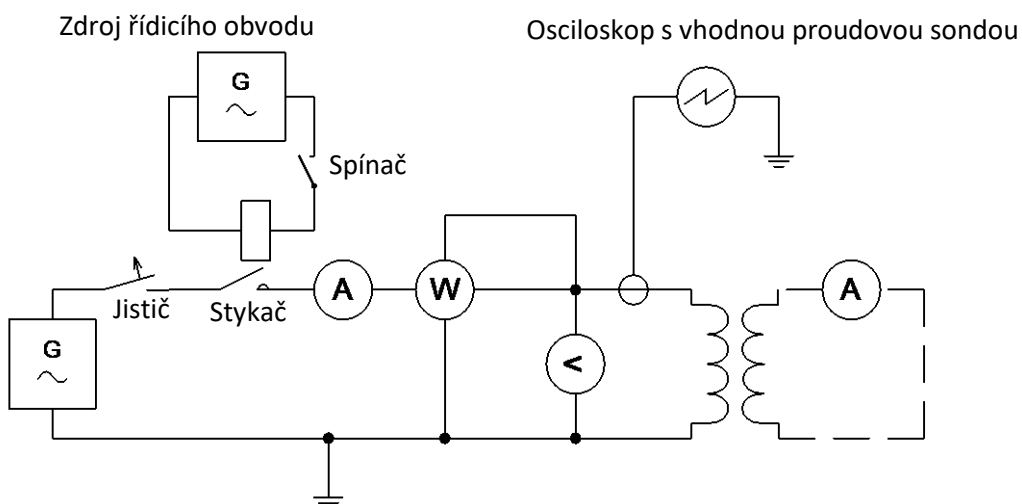
3.1 Schéma měření

Nejjednodušší schéma na měření transformátoru na krátko je zobrazeno na obrázku 32.



Obr. 25 Nejjednodušší schéma na měření transformátoru na krátko[1]

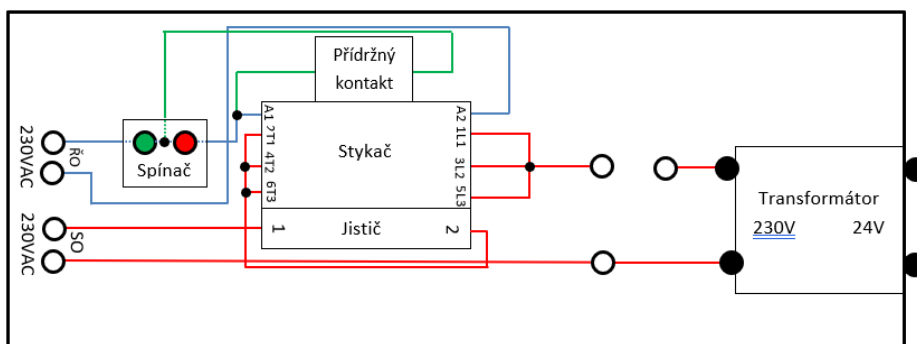
To je ale pro nás nedostatečné, jelikož ten obvod chceme spínat stykačem, a také je pro nás důležité zobrazit průběh přechodných dějů. Tím pádem schéma použité při měření transformátoru na krátko bude:



Obr. 26 Použité schéma, ze kterého bude vycházet přípravek

Při měření na prázdko použijeme stejné schéma, nebude sekundární vinutí spojené vůbec. Čárkovaná čára značí vedení, které při měření na krátko připojené bude, a při měření na prázdko připojené nebude.

Teoretické zapojení přípravku



Obr. 27 Náhled zapojení přípravku

3.2 Postup měření

3.2.1 Měření napětí na krátko U_k

Jako úplně první bylo provedeno měření na zjištění napětí na krátko U_k . Tento parametr bylo důležité znát z důvodu, aby byl zvolen správný jistič a také stykač pro tento měřicí přípravek, kvůli správného dimenzování.

Po zapojení, které je zobrazeno na obr. 25, ale bez wattmetru jsme schopni změřit dané napětí na krátko U_k . Tedy, vstupní napětí bylo na $U = 0$ V a poté se napětí pomalu zvyšovalo, dokud nebylo na primárním vinutí proud s jmenovitou hodnotou I_N .

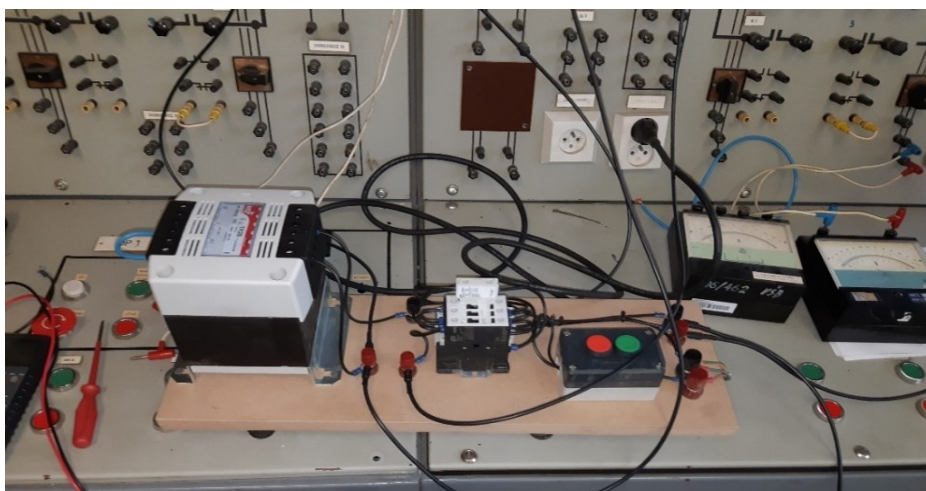


Obr. 28 Měření napětí na krátko

Z měření nám vyplynulo, že hodnota $U_k = 6,9$ V.

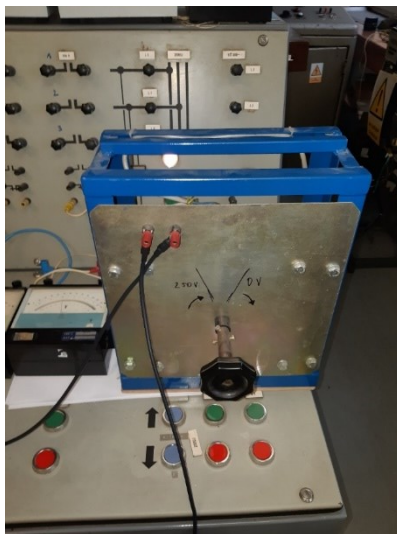
3.2.2 Měření charakteristik na prázdko a na krátko

Potom následovalo změřeni charakteristik na prázdko a na krátko. Již byl využit vyrobený přípravek. Jako zdroj ŘO (řídícího obvodu) byla běžná pomocná zásuvka na měřícím pultu, která byla s přípravkem propojil klasickou šňůrou s vidlicí.



Obr. 29 Zapojení na měření charakteristiky na krátko. Při měření charakteristiky na prázdko se vytáhnul modrý drátek na sekundáru transformátoru.

Při napájení SO (silového obvodu) se využilo napětí mezi dvěma fázemi, což je napětí sdružené. Toto napětí se přivedlo na měkký zdroj v podobě autotransformátoru, ze kterého se potom přivedlo ze sekundárního vinutí napětí na SO přípravku.



Obr. 30 Pomocný autotransformátor na napájení SO přípravku

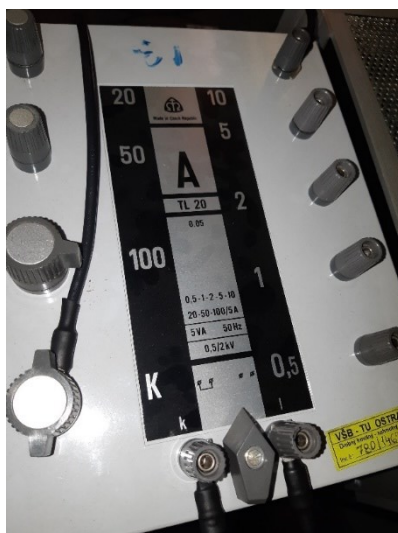
Hodnoty se měřili přes měřící kartu, kterou byla snaha připojit co nejbližší transformátoru, aby se nedostávali hodnoty s velkou odchylkou. Měřící svorky na napětí se přivedli přímo na primární vinutí a na sekundární. Měřící svorky na měření proudu museli být kvůli velkým proudům a bezpečnosti měřící karty prvně připojeny na přístrojový transformátor proudu a z něho přivést hodnoty na měřící kartu. Převod přístrojového transformátoru proudu byl $p = 10$. Měřící karta byla připojena do PC přes kabel UTP. V PC bylo využito rozhraní NI LabView na zaznamenávání hodnot.

Měření probíhalo prvně na prázdno, kdy se na autotransformátoru nastavilo na sekundárním vinutí napětí $U = 0$ V a poté se přibližně s krokem $\Delta U = 10$ V zvyšovalo napětí. Při každém kroku se v rozhraní NI LabView kliklo na „zapiš hodnoty“.

Poté při měření na krátko se postup opakoval jako u měření na prázdno s tím rozdílem, že se do svorek na sekundární vinutí vložil modrý drátek a vytáhli se svorky, kterými se měřilo sekundární napětí při měření na prázdno.



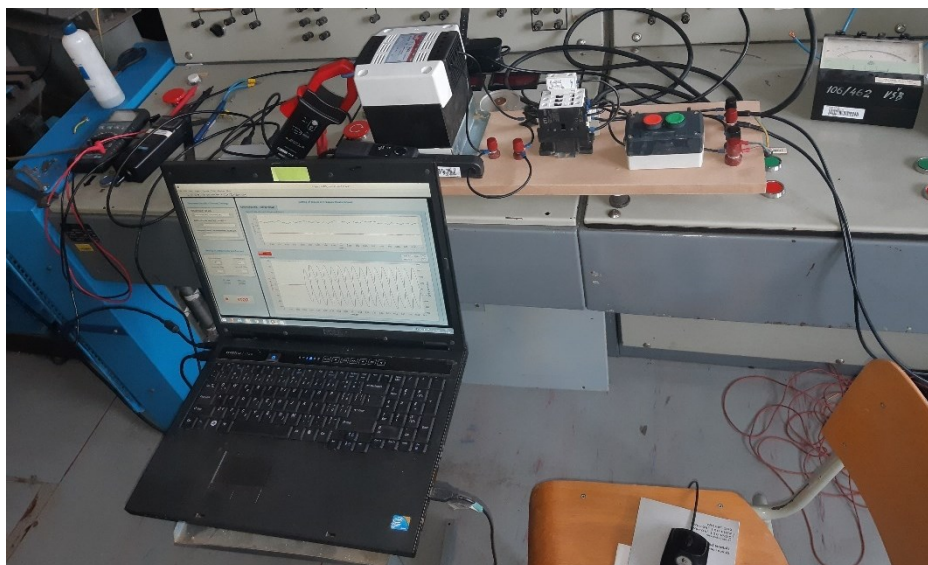
Obr. 31 Vlevo je měřící karta a vpravo PTP



Obr. 32 Náhled na PTP

3.2.3 Měření zapínacího proudu na prázdko a na krátko

Nakonec se měřil zapínací proud transformátoru na prázdko a poté na krátko. Opět bylo měření provedeno na vyrobeném přípravku na měření. Tentokrát se hodnota napětí na vstupu měřila pouze analogovým voltmetrem. Proud byl snímán pomocí dvou klešťových ampérmetrů.



Obr. 33 Zapojení při měření zapínacího proudu

3.3 Výpočty

3.3.1 Výpočet napětí na krátko

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_{1N}} = \frac{6,9}{230} = 0,03 \rightarrow 3\% \quad (12)$$

Tedy poté z těchto hodnot se vypočetla hodnota zkratového proudu I_{ZK} v rovnici (11), díky čemuž se mohli správně zvolit další součástky na tvorbu přípravku.

3.3.2 Výpočet parametrů prvků náhradního schématu při měření na prázdko

Změřením charakteristik byly získány potřebné hodnoty pro výpočet parametrů prvků v zjednodušeném náhradním schématu transformátoru pro měření na prázdko, které je uvedeno na obrázku 3. Výpočtem dokážeme zjistit parametry příčné větve transformátoru, tj. magnetizační reaktanci X_μ a odpor reprezentující ztráty v železe R_{FE} .

Prvně si vypočtu $\cos\varphi_0$:

$$\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{U_{1N} \cdot I_0} = \frac{24,9}{230 \cdot 0,505} = 0,214 \quad (13)$$

Hodnota $\cos\varphi_0$ je stejná jako při odečtení grafu. Výpočet byl proveden hlavně kvůli kontroly. Vyjádřím si $\sin\varphi_0$:

$$\sin\varphi_0 = \sin(\cos^{-1}(\varphi_0)) = \sin(\cos^{-1}(0,214)) = 0,977 \quad (14)$$

Magnetická reaktance je potom rovna:

$$X_\mu = \frac{U_{1N}}{I_0 \cdot \sin\varphi_0} = \frac{230}{0,505 \cdot 0,977} = 466,167 \, \Omega \quad (15)$$

A odpor reprezentující ztráty v železe jsou:

$$R_{FE} = \frac{U_{1N}^2}{\Delta P_0} = \frac{230^2}{24,9} = 2124,498 \, \Omega \quad (16)$$

3.3.3 Výpočet parametrů prvků náhradního schématu při měření na krátko

Tímto výpočtem, stejně jako u výpočtu při měření na prázdko dokážeme parametrizovat podélnou větev transformátorů čili zjednodušené schéma transformátoru, které je uvedené na obrázku 4. Hodnotu ΔP_k odečtu z grafu v příloze D. Hodnotu převodu p využiji z výpočtu dle rovnice (1). Při měření na prázdko byl převod naměřen přibližně o 0,15 menší než u vypočtené hodnoty. Hodnota napětí na krátko před tvorbou přípravku byla změřena a vyšla $U_k = 6,9$ V, což jsou 3 %. Při odečtení z grafu se jedná o hodnotu $U_k = 6,4$ V, tj. 2,8 %. Využiji hodnotu 2,8 %, odečtenou z grafu v příloze D, jelikož jde o přesnější hodnotu.

Prvně si vypočteme odpor vinutí na primární straně.

$$R_V = \frac{\Delta P_k}{I_N^2} = \frac{26}{4,348^2} = 1,375 \, \Omega \rightarrow R_1 = R'_{21} = \frac{R_V}{2} = \frac{1,375}{2} = 0,6875 \, \Omega \quad (17)$$

Poté je potřeba znát převod transformátoru. Vzorec je již uveden v rovnici (1).

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{230}{24} = 9,5833 \quad (18)$$

Jakmile známe převod, můžeme spočítat odpor sekundární strany vinutí:

$$R_{21} = \frac{R_1}{p^2} = \frac{0,6875}{9,5833^2} = 7,486 \text{ m}\Omega \quad (19)$$

Jmenovitá impedance transformátoru je:

$$Z_N = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{230}{4,348} = 52,898 \Omega \quad (20)$$

Potom impedance na krátko:

$$Z_k = \frac{u_{k\%} \cdot Z_N}{100} = \frac{2,8 \cdot 52,898}{100} = 1,481 \Omega \quad (21)$$

Jelikož impedance na krátko je dána velikostí odporu vinutí a rozptylové reaktance, tak si ze vzorce pro impedanci na krátko vyjádřím rozptylovou reaktanci:

$$Z_k = \sqrt{R_K^2 + X_\sigma^2} \rightarrow X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R_K^2} = \sqrt{1,481^2 - 1,375^2} = 0,550 \Omega \quad (22)$$

Z toho jsem si schopen již dopočítat rozptylovou reaktanci primárního vinutí:

$$X_{1\sigma} = \frac{X_\sigma}{2} = \frac{0,550}{2} = 0,275 \Omega \quad (23)$$

A nakonec rozptylovou reaktanci sekundárního vinutí:

$$X_{21\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{p^2} = \frac{0,275}{9,5833^2} = 2,994 \text{ m}\Omega \quad (24)$$

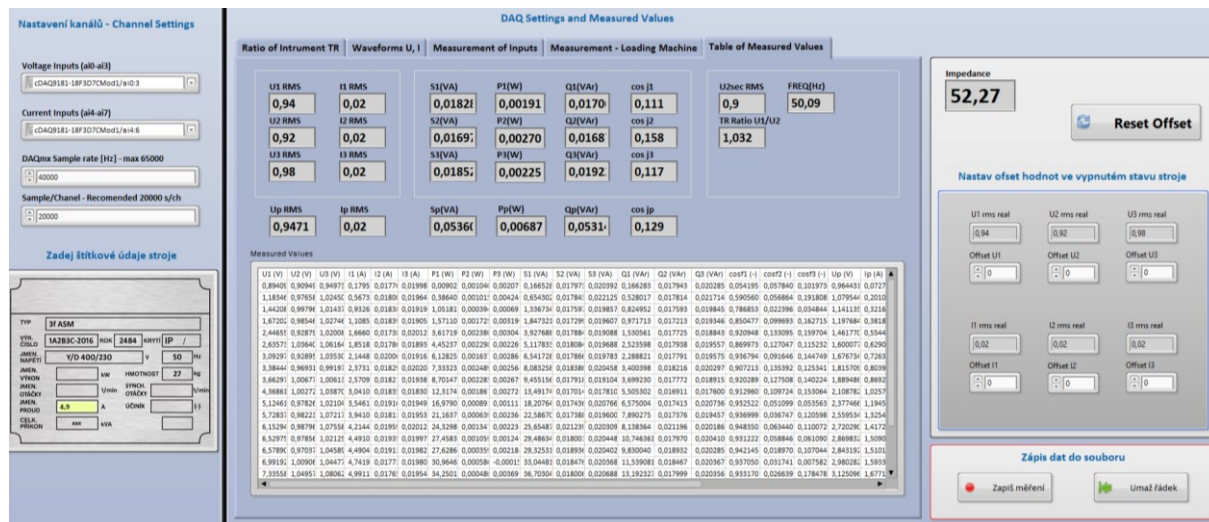
3.3.4 Přehled vypočtených hodnot (parametry transformátoru)

Tabulka 1 Přehled parametrů transformátoru

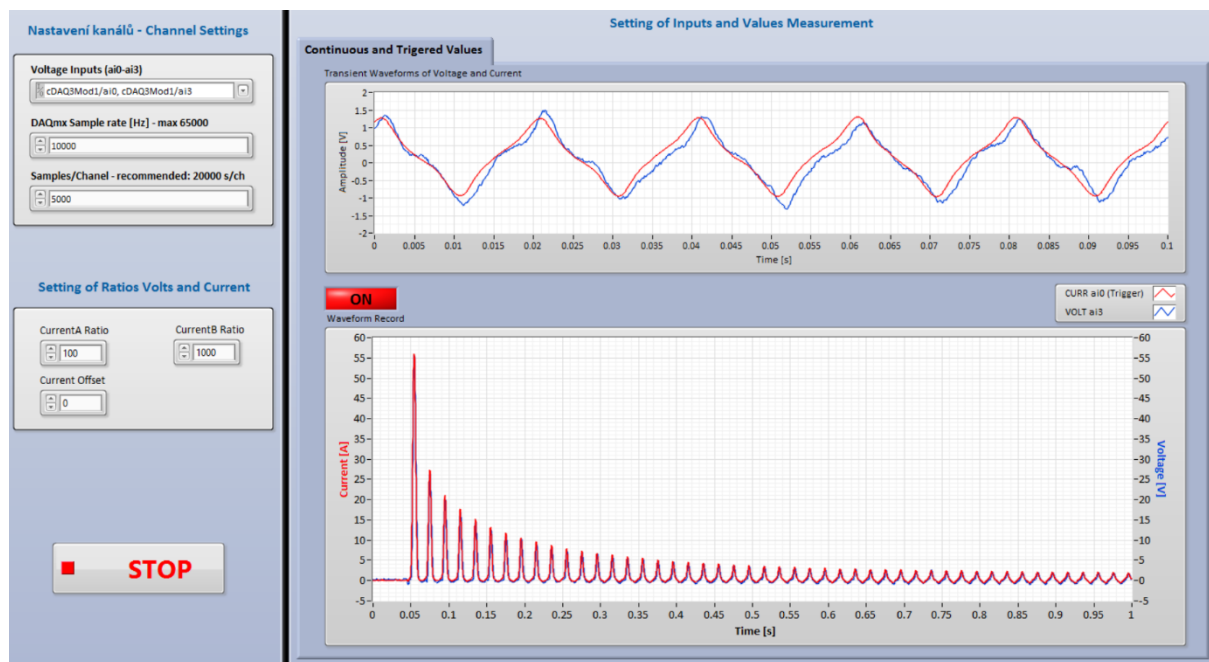
$X_\mu (\Omega)$	466,167
$R_{FE} (\Omega)$	2124,498
$R_1 (\Omega)$	0,6745
$R_{21} (\text{m}\Omega)$	7,344
$X_{1\sigma} (\Omega)$	0,418
$X_{21\sigma} (\text{m}\Omega)$	4,551
$I_0 (\text{A})$	0,505
$u_{k\%} (\%)$	2,8

3.4 Výstup z měření

Jelikož tabulky a grafy jsou obrovské, tak jsem se rozhodl je vložit do příloh. Výstupy z měření jsou v přílohách A-G.



Obr. 34 Náhled do rozhraní NI LabView při měření charakteristiky na krátko



Obr. 35 Náhled do rozhraní NI LabView při měření zapínacího proudu na prázdko

3.5 Závěr měření

V rámci tohoto laboratorního měření v rámci bakalářské práce bylo provedeno měření přípravku tvořeného v rámci BP, který obsahoval 1-f transformátor o výkonu $S_N = 1000 \text{ VA}$ a jmenovitým napětím $U_N = 230/24 \text{ V}$. Na přípravku byl umístěný stykač na spínání a jistič kvůli bezpečnosti.

Prvně bylo provedeno měření, při kterém se mohl transformátor parametrizovat. Proud na prázdno vyšel $I_0 = 0,505 \text{ A}$, což je 11,61 % hodnoty I_N , což odpovídá teorii, kde by se transformátor takové velikosti měl pohybovat při proudu na prázdno s velikostí okolo 10 %. Napětí na krátko vyšlo $U_k = 6,4 \text{ V}$, což je 2,8% hodnoty U_N . Všechny parametry transformátoru lze najít v tabulce 1.

Zapínací proud na prázdno se měřil při jmenovité hodnotě napětí $U_N = 230 \text{ V}$ na primárním vinutí. Měření bylo provedeno 11x. Poté zapínací proud na krátko byl proveden 2x při jmenovité hodnotě napětí $U_N = 230 \text{ V}$ a poté 11x při snížené hodnotě napětí $U = 100 \text{ V}$ kvůli bezpečnosti a snaze co nejméně poškodit součástky, které se z důvodu velkých proudů zahřívali. Při měření jsme vždy obvod sepnuli tlačítkem a po necelé vteřině vypnuli.

Při zapínání na prázdno se muselo provést mnoho měření, ale jen některé nám zachytila měřicí karta, kvůli nastavenému triggeru. To znamená, že nám začal snímat až po tom, co tam zachytil určitou hodnotu proudu. Největší špička proudu na prázdno byla zachycena $I_0 = 54,65 \text{ A}$, což je 12,5x více než je jmenovitá hodnota proudu I_{1N} . Hodnotu špičky proudu pro každé měření lze vidět na grafu v příloze F. Na obrázku 35, lze vidět náhled do programu NI LabView. V horní části obrazovky si lze všimnout proudu, který má hodně dominantní 3. harmonickou.

Měření zapínacího proudu na krátko přineslo méně uspokojivé výsledky než měření zapínacího proudu na prázdno, jelikož průběh se velmi rychle ustálil, a tedy nelze na žádném kromě jednoho průběhu vidět více dynamický přechodný dej. Nejvíce povedený průběh lze vidět na grafu v příloze G.

Z důvodu měkkého zdroje spadlo vždy napětí při měření přibližně o 30 %, co jsem zpozoroval na analogovém voltmetru, takže nejsme schopni dosáhnout vypočtené hodnoty zkratu, jelikož nebyla nijak možnost kompenzovat pokles napětí. Také se tam objevuje chyba šumu kolem $\Delta I = 0,05 \text{ A}$.

4 Tvorba zadání laboratorní úlohy



**Měření transformátoru na prázdkno a na krátko
(parametrizace) a měření zapínacího proudu.**

Datum:

Skupina:

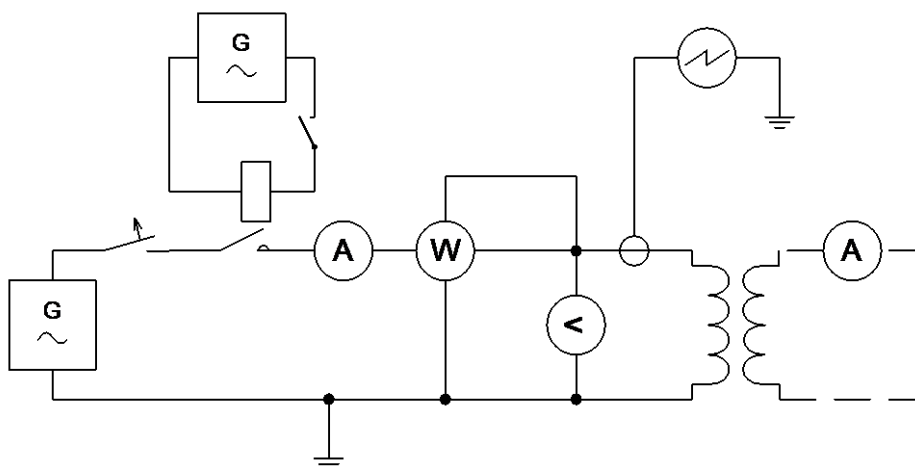
Jméno:

Kód studenta:

1. Zadání:

- Změřte transformátor na prázdkno
- Změřte transformátor na krátko
- Z naměřených hodnot transformátoru na prázdkno vyneste do jednoho grafu závislosti $\Delta P_0 = f(U_1)$, $I = f(U_1)$ a $\cos \varphi_0 = f(U_1)$
- Z naměřených hodnot transformátoru na krátko vyneste do jednoho grafu závislosti $\Delta P_K = f(U_K)$, $I = f(U_K)$ a $\cos \varphi_K = f(U_K)$
- Z odečtených hodnot z grafů vyčtěte hodnoty, ze kterých vypočítejte prvky náhradního schématu transformátoru.
- Poté proveďte měření zapínacího proudu na krátko a na prázdkno na přípravku.

2. Schéma měření:



Obr. 36 Schéma zapojení pro měření laboratorní úlohy

3. Použité přístroje:

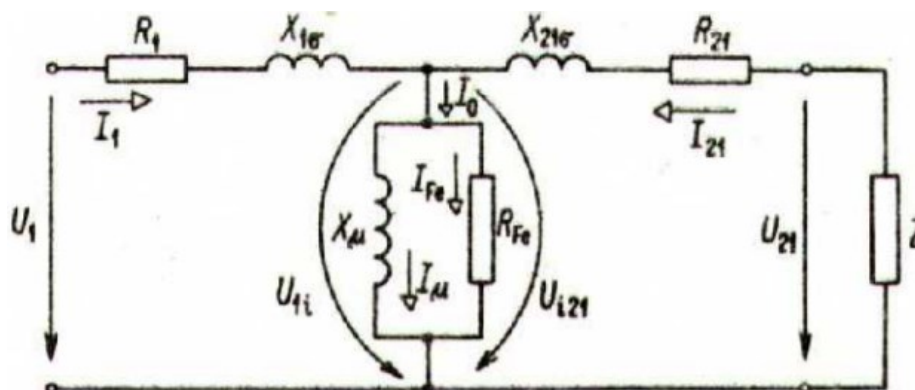
4. Teoretický rozbor:

Transformátor je elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Jeho hlavní funkcí je transformace napětí na vyšší (či nižší) hladiny napětí. Jeho nejdůležitější využití je v přenosové a distribuční části sítě.

Stav na prázdkno je stav, při kterém jsou rozpojené svorky na sekundárním vedení. Ačkoliv transformátor nemá při tomto stavu žádný výkon, stále dochází ke ztrátám. Jelikož účinník transformátoru na prázdkno $\cos \varphi_0$ se pohybuje od hodnot 0,1 až 0,7, tak transformátor odebírá ze sítě jalovou energii a způsobuje úbytky napětí na vedení.

Stav na krátko je definován tak, že na sekundární straně jsou svorky spojeny bez zátěže. Tím pádem obvodem prochází velký zkratový proud, daný zejména velikostí napětí na krátko. Čím vyšší máme napětí na krátko, tím menší zkratový proud máme.

Zapínací proud je proud, který je možné zaznamenat během přechodného děje při zapnutí. Jeho hodnota je dána typem transformátoru. Jeho hodnota je dána velikostí stejnosměrné (přechodné) a ustálené složky. Největší zapínací proud bude v okamžiku průchodu napětí nulou. Je to dáno tím, že transformátor je teoreticky čistě induktivní stroj, a tedy napětí a proud jsou proti sobě posunuty o 90° .



Obr. 37 Náhradní schéma transformátoru [3]

5. Postup měření:

- Připojíme na daný přípravek napájení silového obvodu (SO) a řídicího obvodu (ŘO). Poté na předem připravené svorky připravíme voltmetr, wattmetr a ampérmetr (či se použije měřicí karta).
- Vypočteme si jmenovitý proud transformátoru I_{1N} .
- Prvně s rozpojenými svorkami na sekundární straně transformátoru změříme transformátor na prázdno. Začneme s napětím $U = 0$ V a zvyšujeme napětí s krokem $\Delta U_N = 10$ V až po hodnotu $U = 260$ V.
- Poté opět snížíme napětí na $U = 0$ V, vypnu měřicí pult a potom spojíme svorky sekundární strany.
- Při měření na krátko zvolna zvyšujeme napětí, ale sledujeme proud. Sejmeme minimálně 10 hodnot do hodnoty $130 \% I_{1N}$.
- Z naměřených hodnot sestojíme grafy a odečteme z nich hodnoty potřebné pro výpočet.
- Vypočteme hodnoty prvků náhradního schématu.
- Odpojíme ampérmetr a wattmetr (či se odpojí měřicí karta) a připojíme na primární stranu klešťový ampérmetr napojený na měřicí kartu.
- Obvod vypneme červeným tlačítkem. Prvně nastavíme jmenovitou hodnotu napětí $U_N = 230$ V. Obvod sepneme a uložíme průběh zapínacího proudu na prázdno. Měření provedeme 10x.
- Poté obvod vypneme, spojíme sekundární svorky na SO a nastavíme snížené napětí $U_1 = 100$ V. Snažíme se chytnout průběh, kdy napětí bude nejlépe procházet nulou, abychom měli nejlépe viditelný průběh přechodného děje. Obvod po necelé jedné sekundě vypneme tlačítkem.

6. Tabulky:

Tabulka 2 Naměřené hodnoty na prázdko

U_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	S_1 (VA)	Q_1 (var)	$\cos\varphi_1$ (-)	U_2 (V)	p (-)	f (Hz)

Tabulka 3 Naměřené hodnoty na krátko

U_k (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	S_1 (VA)	Q_1 (var)	$\cos\varphi_1$ (-)	f (Hz)

7. Grafy:

8. Výpočet:

Výpočet hodnot prvků příčné větve náhradního schématu:

$$\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{U_{1N} \cdot I_0} = \frac{\quad}{\quad} = \quad (-) \quad (25)$$

$$\sin\varphi_0 = \sin(\cos^{-1}(\varphi_0)) = \sin(\cos^{-1}(\quad)) = \quad (-) \quad (26)$$

$$X_\mu = \frac{U_{1N}}{I_0 \cdot \sin\varphi_0} = \frac{\quad}{\quad} = \quad \Omega \quad (27)$$

$$R_{FE} = \frac{U_{1N}^2}{\Delta P_0} = \frac{\quad^2}{\quad} = \quad \Omega \quad (28)$$

Výpočet hodnot prvků podélné větve náhradního schématu:

$$R_V = \frac{\Delta P_k}{I_N^2} = \frac{\quad}{\quad^2} = \quad \Omega \rightarrow R_1 = R'_{21} = \frac{R_V}{2} = \frac{\quad}{2} = \quad \Omega \quad (29)$$

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{\quad}{\quad} = \quad (-) \quad (30)$$

$$R_{21} = \frac{R_1}{p^2} = \frac{\quad}{\quad^2} = \quad m\Omega \quad (31)$$

$$Z_N = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{\quad}{\quad} = \quad \Omega \quad (32)$$

$$Z_k = \frac{u_{k\%} \cdot Z_N}{100} = \frac{\quad \cdot \quad}{100} = \quad \Omega \quad (33)$$

$$Z_k = \sqrt{R_K^2 + X_\sigma^2} \rightarrow X_\sigma = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{\quad^2 - \quad^2} = \quad \Omega \quad (34)$$

$$X_{1\sigma} = \frac{X_\sigma}{2} = \frac{\quad}{2} = \quad \Omega \quad (35)$$

$$X_{21\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{p^2} = \frac{\quad}{\quad^2} = \quad m\Omega \quad (36)$$

Tabulka 4 Výsledné hodnoty prvků náhradního schématu transformátoru

$X_\mu (\Omega)$	
$R_{FE} (\Omega)$	
$R_1 (\Omega)$	
$R_{21} (m\Omega)$	
$X_{1\sigma} (\Omega)$	
$X_{21\sigma} (m\Omega)$	
$I_0 (A)$	
$u_{k\%} (\%)$	

9. Závěr:

5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala tvorbou laboratorního přípravku a tvorbě laboratorní úlohy pro studenty předmětu Elektrické stroje I., která by pomohla studentům lépe pochopit problematiku parametrizace transformátorů a nežádáných stavů na transformátoru, to jsou stavy na prázdko a na krátko.

Práci se mi povedlo splnit ve všech předem daných bodech. V teoretické části jsem popsal transformátory obecně, včetně jeho provozních stavů, přechodných dějů při zapínání, a také jsem popsal možnosti spínání a jištění transformátorů NN.

Tvorba přípravku proběhla bez obtíží. Návrh dalších součástí, jističe a stykače, byl proveden po volbě velikosti transformátoru. Všechny součástky byly přidělané na desku jednoduchými šroubovými spoji. Jediná velká nevýhoda tohoto přípravku je jeho váha, která je přibližně kolem 20 kilogramů. Jelikož má ale pomáhat studentům pochopit danou problematiku, a měření bude probíhat pouze na jednom typovém 1-fázovém transformátoru o výkonu $S_N = 1\,000\text{ VA}$, tak to nebude problém, protože přípravek bude celou dobu v laboratoři.

Během testování přípravku v laboratoři, zda je vše v pořádku a přípravek je funkční a použitelný, se nevyskytla žádná komplikace. Tedy z tohoto lze usoudit, že návrh a realizaci přípravku lze považovat za úspěšný, a použitelný při výuce.

6 Literatura

- [1] ČERMÁK, Tomáš a KEPPERT, Svetozar. Elektrické stroje. I, Transformátory. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1984. Skripta. Vysoká škola báňská v Ostravě.
- [2] Náčrty plášťového a jádrového transformátoru. In: Oenergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni>
- [3] Transformátory [online]. STŘEDNÍ ŠKOLA, HAVÍŘOV-ŠUMBARK, SÝKOROVA 1/613 příspěvková organizace, 2009 [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: http://mtom.8u.cz/files/me/ucebni_material/transformatory.pdf
- [4] León F., Gladstone B., Veen M. Transformer Based Solutions to Power Quality Problems. [online]. Powersystems Worlds proceedings, 2001. 13 p. [cit. 19.10.2020]. Dostupné na www: <https://www.toruspower.com/wp-content/uploads/2016/03/Transformer-Based-Solutions-to-Power-Quality-Problems.pdf>
- [5] Průběh zkratového proudu. In: Profielektrika.cz [online]. 12.02.2010 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/prubeh-zkratoveho-proudu-v-siti-nn>
- [6] BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA, Zdeněk ZOUBEK, Jan KOPEČEK a kolektiv. Měření na elektrických stojích: 2. měření na transformátorech. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. DT 621.317.7-621.314.2.
- [7] STYKAČE A RELÉ [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.2-Styka%C4%8D-a-rel%C3%A9.pdf>
- [8] Stykač Kanlux KMC-20-11 2p na DIN lištu 1 fázový [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: https://www.elektro-paloucek.cz/jistici-technika-stykace-c-1124_858/stykac-kanlux-kmc-20-11-2p-na-din-listu-1-fazovy-p-19375
- [9] Relé cívka 230VAC, kontakt 250VAC/8A 2x přepínací 40.52.8.230.0000 [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rele-s-ac-civkou-230v-finder-40-52-8-230-0000>
- [10] Polovodičová relé SSR [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2775/1/Ryba_BP_2012_polovodicova_rele_SSR.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jiří Fořt, Ph.D., str. 15
- [11] RM1E23V25 [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rm1e23v25>
- [12] Vypínací charakteristika. In: Oenergetice.cz [online]. 2017 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/elektricke-ochrany-v-soustavach-nizkeho-napeti-jistic>
- [13] Otevřený skutečný jistič. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/329-jistic>
- [14] Jistič 32A jednofázový Eaton PL7-32/1/B. In: Moje-elektro.cz [online]. [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://mojeelektro.cz/jistice-jednofazove/16115-jistic-32a-jednofazovy-eaton-pl7-32-1-b.html>
- [15] Časově-proudová charakteristika. In: *Shopdelta.eu* [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: https://shopdelta.eu/pojistkova-vlozka-eti-d0225a-25-a-400-v-gl-gg-e18-eti_l8_p12181.html
- [16] HAVELKA, O. Elektrické přístroje. První. Praha: SNTL, 1985.
- [17] HELŠTÝN, David, Petr KAČOR a Zdeněk HYTKA. Elektrické přístroje spínací ochranné a jisticí [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003 [cit. 2021-04-08]. ISBN 80-248-0315-1. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ep/ep_II/Elektricke%20%20pristroje%20spinac%20%20ochrann%20a%20jistici.pdf?fbclid=IwAR2XjLFu620Ytkg3BINSzTxyC2Kn11cKIDrmn5C35HJFTzm_ySNFLT_loOY

Seznam příloh

Příloha A, Naměřené záznamy z NI LabView při měření na prázdkno, tabulka	46
Příloha B, Naměřené záznamy z NI LabView při měření na krátko, tabulka	47
Příloha C, Průběh závislosti I_0 , P_0 a $\cos\varphi_0$ na jmenovitém napětí, graf	48
Příloha D, Průběh závislosti I_k , P_k a $\cos\varphi_k$ na napětí na krátko, graf	49
Příloha E, Průběh největšího naměřeného zapínacího proudu, graf	50
Příloha F, Porovnání naměřených maximálních hodnot proudu na prázdkno, graf	51
Příloha G, Průběh zapínacího proudu na krátko při sníženém napětí 100V, graf	52

Přílohy

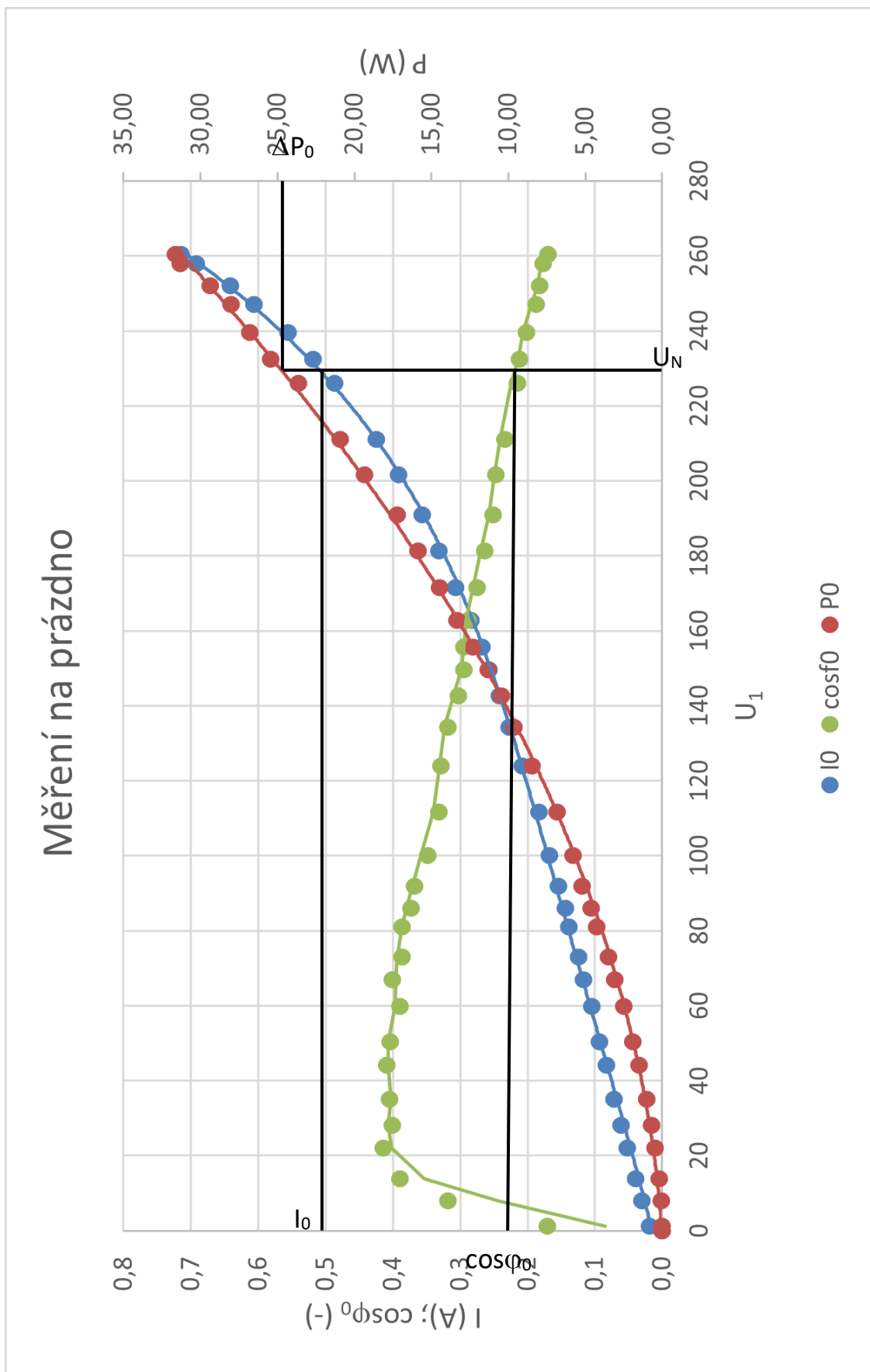
Příloha A: Naměřené záznamy z NI LabView při měření na prázdkno

U_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	S_1 (VA)	Q_1 (var)	$\cos\varphi_1$ (-)	U_2 (V)	p (-)	f (Hz)
0,00	0,0001	0,00	0,00	0,00	0,0001	0,00	1,00	50,00
1,24	0,0187	0,00	0,03	0,02	0,1701	0,91	1,60	50,01
7,94	0,0299	0,07	0,21	0,20	0,3182	1,11	6,89	49,98
13,86	0,0390	0,21	0,54	0,50	0,3893	1,56	8,96	49,99
22,09	0,0523	0,46	1,11	1,01	0,4141	2,31	9,54	49,98
28,01	0,0614	0,70	1,75	1,60	0,4004	2,95	9,37	50,00
35,08	0,0711	1,02	2,51	2,29	0,4051	3,63	9,66	50,00
44,20	0,0829	1,52	3,72	3,40	0,4088	4,72	9,65	50,00
50,44	0,0935	1,90	4,71	4,30	0,4044	5,22	9,47	50,01
59,82	0,1049	2,50	6,40	5,89	0,3900	6,31	9,54	50,01
66,96	0,1170	3,08	7,69	7,05	0,4006	7,04	9,54	50,01
72,96	0,1241	3,50	9,06	8,35	0,3865	7,72	9,51	50,02
80,97	0,1387	4,26	11,01	10,15	0,3866	8,48	9,52	50,02
86,05	0,1442	4,60	12,33	11,44	0,3733	9,06	9,47	50,01
91,89	0,1545	5,19	14,09	13,10	0,3681	9,72	9,43	50,01
100,05	0,1670	5,77	16,57	15,54	0,3482	10,60	9,45	50,00
111,64	0,1835	6,82	20,60	19,44	0,3313	11,78	9,47	50,00
124,00	0,2077	8,44	25,65	24,23	0,3290	13,13	9,45	50,00
134,30	0,2273	9,65	30,34	28,77	0,3179	14,28	9,45	50,01
142,57	0,2416	10,45	34,52	32,90	0,3028	15,04	9,45	50,01
149,63	0,2569	11,29	38,38	36,68	0,2943	15,89	9,41	50,01
155,69	0,2678	12,29	41,79	39,94	0,2940	16,52	9,44	50,01
162,77	0,2845	13,34	46,34	44,38	0,2879	17,24	9,42	50,01
171,53	0,3069	14,46	52,57	50,54	0,2750	18,31	9,38	50,01
181,23	0,3319	15,87	60,15	58,02	0,2638	19,21	9,42	50,01
190,95	0,3564	17,23	68,66	66,46	0,2510	20,33	9,39	50,00
201,67	0,3913	19,33	78,21	75,78	0,2472	21,49	9,40	50,00
211,04	0,4247	20,91	89,58	87,11	0,2334	22,45	9,40	49,99
226,02	0,4863	23,65	110,01	107,43	0,2150	24,06	9,37	49,99
232,38	0,5184	25,46	120,10	117,37	0,2120	24,68	9,40	49,99
239,57	0,5562	26,79	133,20	130,48	0,2011	25,53	9,42	50,00
247,00	0,6059	28,04	149,70	147,05	0,1873	26,32	9,40	50,00
251,97	0,6418	29,36	161,16	158,46	0,1822	26,85	9,40	50,00
257,92	0,6919	31,32	176,91	174,11	0,1771	27,53	9,41	50,01
260,36	0,7150	31,64	186,27	183,56	0,1698	27,67	9,40	50,01

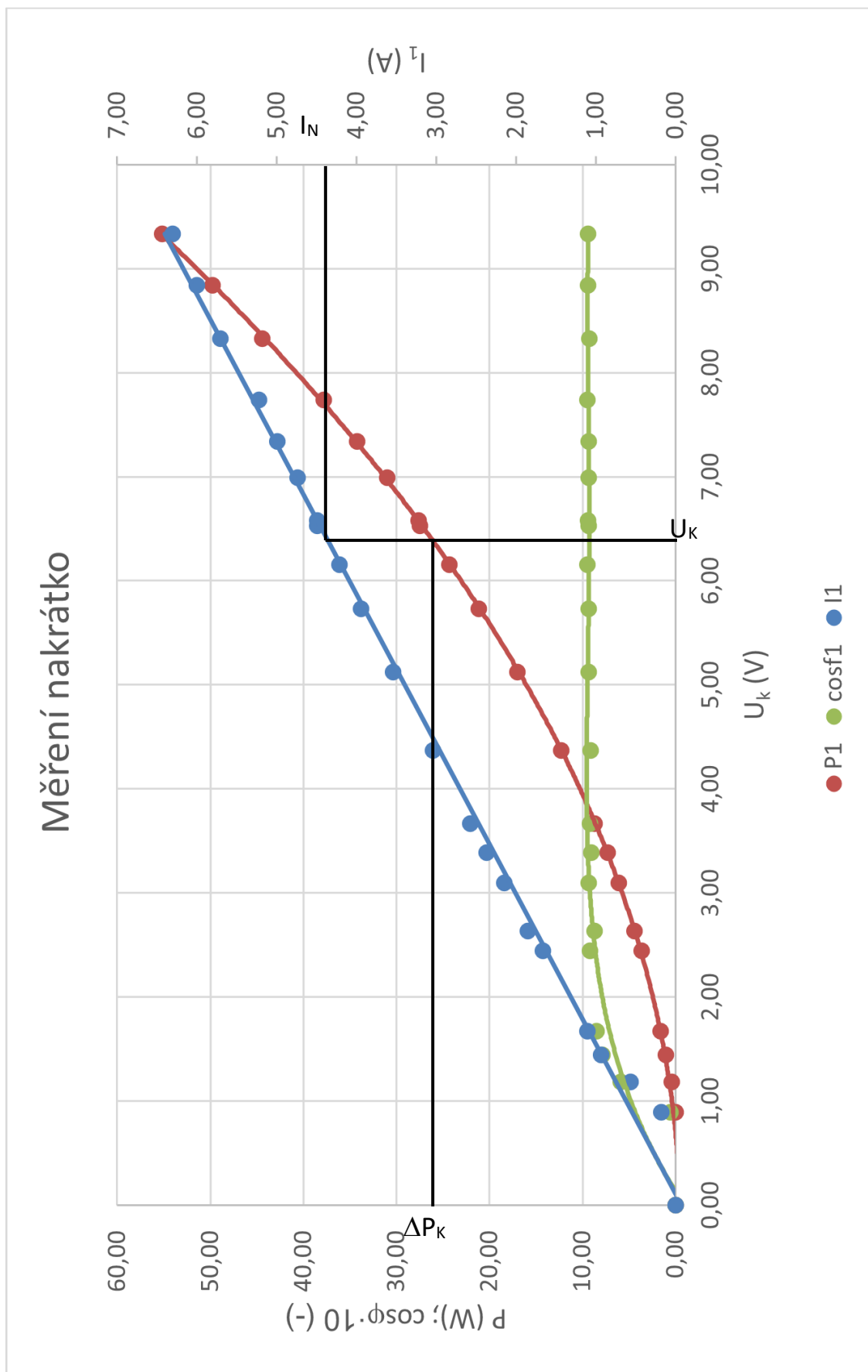
Příloha B: Naměřené záznamy z NI LabView při měření na krátko

U_k (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	S_1 (VA)	Q_1 (var)	$\cos\varphi_1$ (-)	$\cos\varphi_1 \cdot 10(-)$	f (Hz)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	50,00
0,89	0,18	0,01	0,17	0,17	0,0542	0,54	50,18
1,18	0,57	0,39	0,65	0,53	0,5906	5,91	50,17
1,44	0,93	1,05	1,34	0,82	0,7869	7,87	50,08
1,67	1,11	1,57	1,85	0,97	0,8505	8,50	50,08
2,45	1,67	3,62	3,93	1,53	0,9209	9,21	49,91
2,64	1,85	4,45	5,12	2,52	0,8700	8,70	50,08
3,09	2,14	6,13	6,54	2,29	0,9368	9,37	50,04
3,38	2,37	7,33	8,08	3,40	0,9072	9,07	50,01
3,66	2,57	8,70	9,46	3,70	0,9203	9,20	50,04
4,37	3,04	12,32	13,49	5,51	0,9130	9,13	49,97
5,12	3,55	16,98	18,21	6,58	0,9325	9,33	50,03
5,73	3,94	21,16	22,59	7,89	0,9370	9,37	50,06
6,15	4,21	24,33	25,65	8,14	0,9484	9,48	50,03
6,53	4,49	27,46	29,49	10,75	0,9312	9,31	50,01
6,58	4,49	27,63	29,33	9,83	0,9421	9,42	49,99
6,99	4,74	30,96	33,04	11,54	0,9371	9,37	49,99
7,34	4,99	34,25	36,70	13,19	0,9332	9,33	49,98
7,74	5,23	37,81	39,92	12,80	0,9472	9,47	49,98
8,33	5,71	44,43	47,83	17,71	0,9290	9,29	49,99
8,84	6,00	49,78	53,09	18,47	0,9375	9,38	50,00
9,34	6,31	55,21	58,59	19,62	0,9423	9,42	50,00

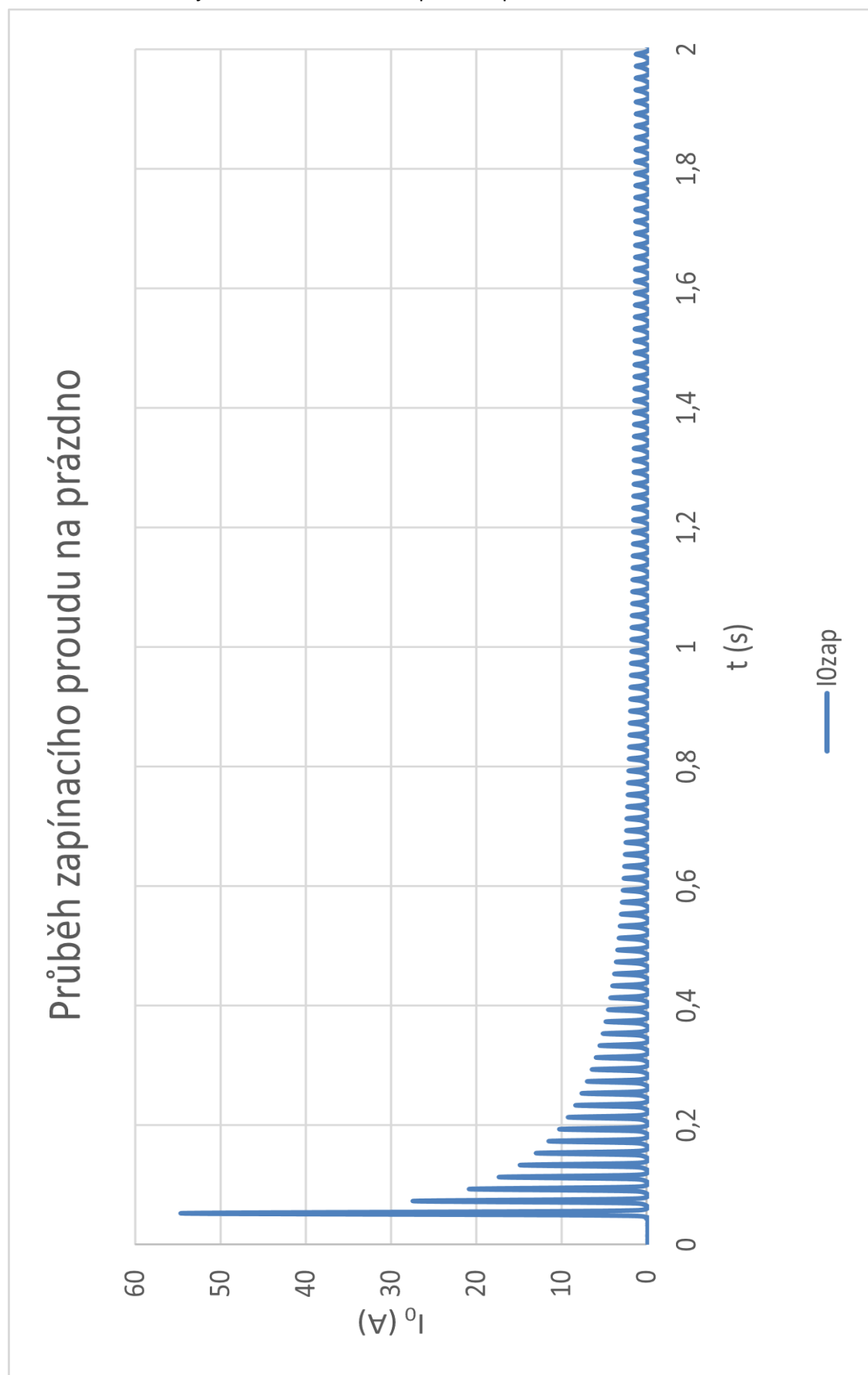
Příloha C: Průběh závislosti I_0 , P_0 a $\cos\varphi_0$ na jmenovitém napětí

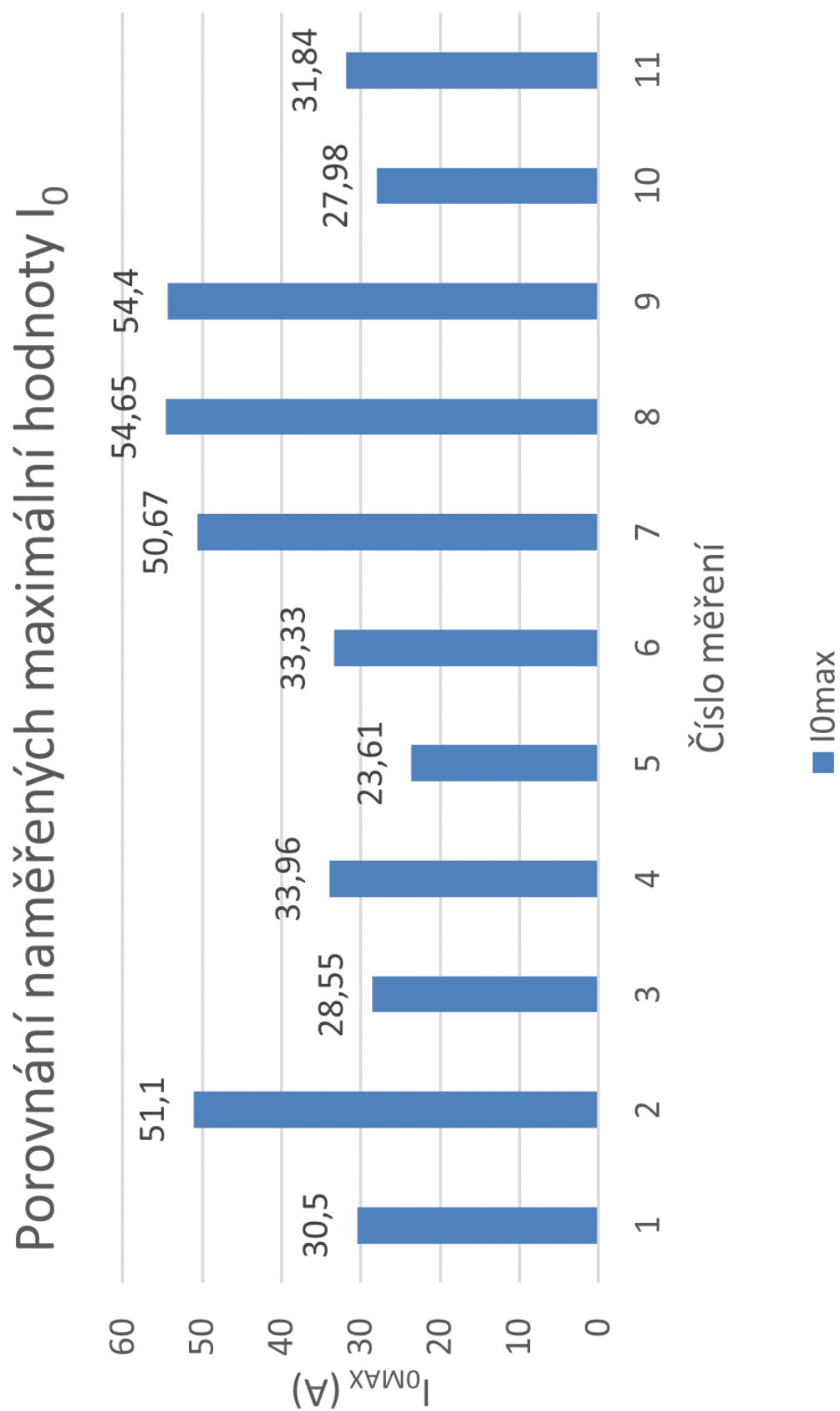


Příloha D: Průběh závislosti I_k , P_k a $\cos\varphi_k$ na napětí na krátko



Příloha E: Průběh největšího naměřeného zapínacího proudu





Příloha G: Průběh zapínacího proudu na krátko při sníženém napětí 100V

